

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
MARIANA DE SIQUEIRA GUERSOLA

**OTIMIZAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO FÍSICA DE PRODUTOS A GRANEL: UMA
APLICAÇÃO À DISTRIBUIÇÃO DE GÁS**

CURITIBA
2013

MARIANA DE SIQUEIRA GUERSOLA

**OTIMIZAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO FÍSICA DE PRODUTOS A GRANEL: UMA
APLICAÇÃO À DISTRIBUIÇÃO DE GÁS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, área de concentração Métodos de Pesquisa Operacional, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Teresinha
Arns Steiner
Co-orientador: Prof. Dr. Cassius Tadeu
Scarpin

CURITIBA

2013

FOLHA DE APROVAÇÃO

MARIANA DE SIQUEIRA GUERSOLA

OTIMIZAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO FÍSICA DE PRODUTOS A GRANEL: UMA APLICAÇÃO À DISTRIBUIÇÃO DE GÁS

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Prof^a. Maria Teresinha Arns Steiner, Dr^a.
Orientadora - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção da UFPR

Prof. Arinei Carlos Lindbeck da Silva, Dr.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção da UFPR

Prof. Marcelo Gechele Cleto, Dr.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção da UFPR

Prof. Heitor Silvério Lopes
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica e Informática Industrial da UTFPR

CURITIBA, 08 de março de 2013.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho, direta ou indiretamente. Seria inviável citar todos os nomes. Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, e a todos os professores que dele participam, assim como a todos os colegas, pela criação de um ambiente de aprendizagem.

Agradeço à minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Maria Teresinha Arns Steiner, por todos os ensinamentos, ideias e correções, e principalmente por estar sempre disponível quando precisei. Agradeço igualmente ao meu co-orientador, Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin, pelos dados fornecidos, pela ajuda com a implementação dos métodos, e pelas inúmeras sugestões.

Agradeço a todos os meus amigos, novos e antigos, próximos ou distantes, pela amizade, por todo o apoio, pela companhia, pelas trocas de confidências, pelos conselhos, e por compreenderem meus momentos de ausência em função do mestrado. Agradeço à minha irmã, Izabel de Siqueira Guersola, por ser a amiga mais importante, apesar de todas as nossas diferenças.

Agradeço à minha mãe, Ludmira Xavier de Siqueira, pelo amor incondicional, pelo apoio, por todos os conselhos dados, por estar sempre por perto e por tudo o que fez para que a minha criação fosse completa. Agradeço ao meu pai, Luiz Roberto Varejão Guersola, também pelo amor incondicional, por ter estado sempre próximo de coração apesar da distância física, e principalmente por ser capaz de enxergar e ensinar aquilo que as outras pessoas costumam ignorar, com todos os seus conselhos sábios e únicos.

Agradeço ao meu amor, Flávio Vinícius Lopes, pelo amor, carinho, companheirismo, incentivo e paciência. Por todas as nossas conquistas individuais e conjuntas, e principalmente pela força e persistência. Agradeço aos meus sogros, Flávio Eduardo e Edinalva, por me acolherem como filha, e principalmente pelo exemplo de fé.

Agradeço, finalmente, a Deus. Por todas as bênçãos concedidas, pela minha família, pela minha saúde, pelas lições e oportunidades que coloca em meu caminho, e por estar sempre comigo, pois sem ele eu nada seria.

“Se podes olhar, vê. Se podes ver, repara.”

José Saramago

RESUMO

A distribuição física é uma atividade crítica das empresas, pois define o sucesso no processo de atendimento aos clientes. Este estudo de caso foi realizado em uma distribuidora de GLP, com o objetivo de viabilizar o estoque gerenciado pelo fornecedor, o qual melhora o atendimento aos clientes e reduz os custos de entrega. A metodologia aqui proposta para o processo de entrega é composta de três etapas. Primeiramente, foi elaborado um algoritmo para determinação de quais clientes atender a cada dia, respeitando as restrições cabíveis e buscando economia de escala. Na segunda etapa, os clientes do dia foram distribuídos para os caminhões de entrega utilizando a meta-heurística *Iterated Local Search (ILS)* para o problema das p -Medianas Capacitado. A meta-heurística foi ainda aplicada a algumas instâncias da literatura para avaliar sua eficiência em problemas de diferentes tamanhos. A terceira e última etapa consistiu da determinação da rota de cada caminhão utilizando-se novamente a meta-heurística *ILS*, desta vez, para o Problema do Caixeiro Viajante. Os resultados apontaram para uma redução superior a 90% nas falhas de serviço, além de um aumento de 72% da quantidade de produto vendido por quilômetro percorrido. Estes resultados geram uma melhoria tanto do nível de serviço oferecido aos clientes, quanto de economia de escala, o que viabiliza o estoque gerenciado pelo fornecedor.

Palavras-chave: Distribuição Física. Agrupamento Capacitado. Roteirização de Veículos. *Iterated Local Search (ILS)*.

ABSTRACT

Physical distribution is a critical business activity, as it defines the success of customer services. This case was conducted in an LPG distributor, with the goal of enabling the vendor managed inventory, which improves customer service and reduces delivery costs. The methodology proposed consisted of three steps. First, an algorithm, made to choose which clients should be refueled every day, respecting restrictions applied and seeking for scale economies, was developed. In the second stage, the Iterated Local Search (ILS) meta-heuristic, made for the Capacitated p-Median Problem, was used to distribute the customers of the day to delivery trucks. The meta-heuristic was also applied to some literature instances in order to assess its efficiency in different size problems. The third and final stage consisted of determining the route for each truck. The ILS meta-heuristic was used, this time for the Traveling Salesman Problem. The results showed a reduction over 90% in service failures, and a 72% increase in the amount of product sold per kilometer driven. These results allow a much improved service level offered to customers, and costs reductions, which enables the vendor managed inventory.

Keywords: Physical Distribution. Capacitated p-Median Problem. Traveling Salesman Problem. Iterated Local Search (ILS).

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Disposição geográfica dos clientes	18
Figura 2.2 – Clientes atuais e agrupamento atual para 08.12	22
Figura 3.1 – Exemplo do Problema das p-Medianas Capacitado.....	26
Figura 3.2 – Exemplo do Problema do Caixeiro Viajante	29
Figura 3.3 – Procedimento ILS.....	32
Figura 4.1 – Etapas da metodologia proposta.....	33
Figura 4.2 – Fluxograma para escolha dos clientes a serem reabastecidos.....	34
Figura 5.1 – Grupo 1 e sua mediana, clientes atuais agrupados pelo método exato para o dia 08/12	50
Figura 5.2 – Grupo 2 e sua mediana, clientes atuais agrupados pelo método exato para o dia 08/12	50
Figura 5.3 – Grupo 3 e sua mediana, clientes atuais agrupados pelo método exato para o dia 08/12	50
Figura 5.4 – Clientes atuais e agrupamento atual para 08.12	52
Figura 5.5 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 08.12	52
Figura 5.6 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 14.12	55
Figura 5.7 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 14.12	56
Figura 5.8 – rota definida pelo método exato para o grupo 1 de 13/12, considerando clientes propostos e agrupados pela ILS para agrupamento	62
Figura 5.9 – rota definida pela ILS para o PCV para o grupo 1 de 13/12, considerando clientes propostos e agrupados pela ILS para agrupamento.....	62
Figura A.1 – Clientes atuais e agrupamento atual para 05.12.....	72
Figura A.2 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 05.12.....	72
Figura A.3 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 05.12....	73
Figura A.4 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 05.12.....	73
Figura A.5 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 05.12	74
Figura A.6 – Clientes atuais e agrupamento atual para 06.12.....	74
Figura A.7 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 06.12	75
Figura A.8 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 06.12....	75
Figura A.9 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 06.12.....	76
Figura A.10 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 06.12	76
Figura A.11 – Clientes atuais e agrupamento atual para 07.12.....	77
Figura A.12 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 07.12	77
Figura A.13 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 07.12..	78
Figura A.14 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 07.12.....	78
Figura A.15 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 07.12	79
Figura A.16 – Clientes atuais e agrupamento atual para 08.12.....	79
Figura A.17 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 08.12	80
Figura A.18 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 08.12..	80
Figura A.19 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 08.12.....	81
Figura A.20 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 08.12	81
Figura A.21 – Clientes atuais e agrupamento atual para 09.12.....	82

Figura A.22 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 09.12	82
Figura A.23 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 09.12..	83
Figura A.24 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 09.12.....	83
Figura A.25 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 09.12	84
Figura A.26 – Clientes atuais e agrupamento atual para 10.12.....	84
Figura A.27 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 10.12	85
Figura A.28 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 10.12..	85
Figura A.29 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 10.12.....	86
Figura A.30 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 10.12	86
Figura A.31 – Clientes atuais e agrupamento atual para 12.12.....	87
Figura A.32 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 12.12	87
Figura A.33 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 12.12..	88
Figura A.34 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 12.12.....	88
Figura A.35 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 12.12	89
Figura A.36 – Clientes atuais e agrupamento atual para 13.12.....	89
Figura A.37 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 13.12	90
Figura A.38 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 13.12..	90
Figura A.39 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 13.12.....	91
Figura A.40 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 13.12	91
Figura A.41 – Clientes atuais e agrupamento atual para 14.12.....	92
Figura A.42 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 14.12	92
Figura A.43 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 14.12..	93
Figura A.44 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 14.12.....	93
Figura A.45 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 14.12	94
Figura A.46 – Clientes atuais e agrupamento atual para 15.12.....	94
Figura A.47 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 15.12	95
Figura A.48 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 15.12..	95
Figura A.49 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 15.12.....	96
Figura A.50 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 15.12	96
Figura A.51 – Clientes atuais e agrupamento atual para 16.12.....	97
Figura A.52 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 16.12	97
Figura A.53 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 16.12..	98
Figura A.54 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 16.12.....	98
Figura A.55 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 16.12	99
Figura A.56 – Clientes atuais e agrupamento atual para 17.12.....	99
Figura A.57 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 17.12	100
Figura A.58 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 17.12	100
Figura A.59 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 17.12...	101
Figura A.60 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 17.12	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Detalhamento da programação de atendimentos proposta	46
Tabela 5.2 – Comparação entre os métodos atual e proposto para escolha de clientes	48
Tabela 5.3 – Comparação entre os métodos atual e proposto após adaptação	48
Tabela 5.4 – Resultado da formulação exata para o agrupamento capacitado dos clientes propostos pela empresa.....	51
Tabela 5.5 – Comparação entre a situação atual e proposta utilizando agrupamento pelo método exato.....	53
Tabela 5.6 – Comparação dos resultados dos agrupamentos realizados pelo método exato e algoritmo ILS	54
Tabela 5.7 – Comparação entre a situação atual e proposta utilizando agrupamento ILS.....	56
Tabela 5.8 – Resultados do agrupamento ILS para as instâncias da literatura.....	58
Tabela 5.9 – Tempo computacional para agrupamento das instâncias da literatura.	59
Tabela 5.10 – Comparação do PCV pelos métodos exato e ILS	59
Tabela 5.11 – Impacto da localização da empresa na distância percorrida	63
Tabela 5.12 – Quantidade demandada por distância. Comparação entre a situação atual e o método proposto.....	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Clientes atendidos pela empresa aqui analisada	19
Quadro 2.2 – Restrições de dias de entrega dos clientes atendidos pela empresa ..	19
Quadro 4.1 – Instâncias da literatura para o problema das p-medianas capacitado.	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.2	JUSTIFICATIVA	14
1.3	LIMITAÇÕES.....	15
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	16
2.1	SOLUÇÃO ATUAL ADOTADA PELA EMPRESA PARA A DISTRIBUIÇÃO ...	17
2.2	DADOS LEVANTADOS.....	18
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
3.1	DISTRIBUIÇÃO FÍSICA	23
3.1.1	Estoque Administrado pelo Fornecedor e o Cronograma de Entrega	24
3.2	PROBLEMA DE AGRUPAMENTO CAPACITADO	25
3.3	PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO.....	28
3.4	ALGORITMO <i>ILS</i>	30
4	METODOLOGIA PROPOSTA	33
4.1	FILTRAGEM DOS CLIENTES.....	33
4.2	AGRUPAMENTO DOS PONTOS DE DEMANDA.....	36
4.2.1	Método Exato	37
4.2.2	Algoritmo <i>ILS</i>	38
4.3	ROTEIRIZAÇÃO.....	41
4.3.1	Método Exato	41
4.3.2	Algoritmo <i>ILS</i>	42
4.4	COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS.....	44
5	RESULTADOS.....	46
5.1	FILTRAGEM DOS CLIENTES.....	46
5.2	AGRUPAMENTO DOS PONTOS DE DEMANDA.....	49
5.2.1	Método Exato	49
5.2.2	Algoritmo <i>ILS</i>	54
5.2.3	Algoritmo <i>ILS</i> Aplicado a Instâncias da Literatura	57
5.3	ROTEIRIZAÇÃO.....	59
5.4	COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS.....	64
6	CONCLUSÕES	66
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
	REFERÊNCIAS.....	69
	APÊNDICE A – AGRUPAMENTOS	72

1 INTRODUÇÃO

Serviços de entrega mais customizados têm se tornado um fator cada vez mais importante na obtenção de vantagem competitiva pelas empresas de distribuição de produtos. Isso ocorre em função da exigência crescente dos clientes no que diz respeito a prazos e qualidade de entrega (MELO E FERREIRA FILHO, 2001).

A distribuição física define o sucesso no processo de atendimento aos clientes, sendo, portanto, uma das principais atividades das empresas, e entre as principais decisões de distribuição física de produtos estão a roteirização e programação de veículos (ENOMOTO e LIMA, 2007). Segundo Ballou (2006), a distribuição física se dá nos níveis estratégico, tático e operacional e os problemas de agrupamento e roteirização são tratados no nível operacional, ou seja, no curto prazo.

Belfiore, Costa e Fávero (2006) trazem o conceito de Problema de Estoque e Roteirização, no qual o estoque do cliente é gerenciado pelo fornecedor, que decide quando e quanto entregar de mercadoria, administrando o reabastecimento ótimo dos estoques e também a distribuição física. O objetivo passa a ser determinar a cada dia quais clientes visitar e qual rota percorrer de modo a minimizar os custos de distribuição, obedecendo à restrição de que as demandas dos clientes sejam atendidas.

O estudo de caso abordado neste trabalho foi realizado em uma empresa distribuidora de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) a granel, que objetiva tratar sua distribuição física como um Problema de Estoque e Roteirização, sem a utilização de Troca de Dados por via Eletrônica (*Electronic Data Interchange - EDI*), ou seja, sem receber eletronicamente informações sobre a necessidade de reabastecimento dos clientes.

Cunha (2000) afirma que em roteirização de veículos deve-se buscar uma solução customizada para cada problema, pois uma solução para determinado tipo de dados pode não ser adequada a outro problema similar. As técnicas de Pesquisa Operacional aplicadas aos problemas de gestão operacional da distribuição física apresentam-se como ferramentas eficientes na busca por economia de escala, pois

auxiliam na diminuição das distâncias percorridas e dos custos de transporte, ao mesmo tempo em que mantém o nível de serviço exigido pelos clientes.

Entre os problemas envolvidos na distribuição física estão o problema de agrupamento capacitado e o problema de roteirização de veículos, os quais são complexos, o que dificulta a busca por soluções exatas e traz a necessidade da utilização de algoritmos heurísticos ou meta-heurísticos, capazes de chegar a soluções de boa qualidade em tempo computacional baixo.

A meta-heurística *Iterated Local Search (ILS)* consiste em quatro procedimentos: construção da solução inicial; busca local (melhoria), perturbação (diversificação) e aceitação da solução. Este algoritmo, apesar de desenvolvido recentemente, já foi utilizado com sucesso em diversos problemas de otimização. (BRITO *et al.*, 2008).

A questão de pesquisa investigada neste trabalho consistiu na seguinte verificação: é possível utilizar a meta-heurística *ILS* para melhorar o sistema de entrega da distribuidora de gás, resolvendo os problemas de agrupamento capacitado e do caixeiro viajante, de forma a viabilizar a utilização do estoque gerenciado pelo fornecedor?

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desse estudo de caso foi propor um método que, utilizando a meta-heurística *ILS* para resolver os problemas de agrupamento capacitado e do caixeiro viajante, possa melhorar o processo de distribuição física da empresa estudada, de forma a viabilizar o estoque gerenciado pelo fornecedor sem a utilização de troca de dados por via eletrônica.

Os objetivos específicos desse trabalho foram:

- a) Analisar e descrever a situação atual da empresa.
- b) Propor uma maneira de escolher quais clientes devem ser reabastecidos a cada dia.
- c) Utilizar a meta-heurística *ILS* para resolver o problema de agrupamento capacitado do estudo de caso.
- d) Aplicar a meta-heurística *ILS* para resolver o problema de agrupamento capacitado a instâncias da literatura, comparando seu desempenho com os melhores resultados encontrados.

- e) Utilizar a meta-heurística *ILS* para resolver o problema de roteirização de veículos (problema do caixeiro viajante).
- f) Comparar a situação atual da empresa com os resultados obtidos após a realização dos passos anteriores, analisando a viabilidade do estoque gerenciado pelo fornecedor para a distribuição a granel.

1.2 JUSTIFICATIVA

O presente estudo de caso, abordando modelos exatos e meta-heurísticos, se enquadra na grande área de Pesquisa Operacional, além de apresentar contribuição à Logística, o que justifica a pesquisa inserida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Paraná.

Socialmente, este trabalho é justificado por dois motivos. Primeiramente, Alvarenga e Novaes (2000) afirmam que a distribuição física ocupa um lugar de destaque nos problemas logísticos das empresas não apenas em função dos custos envolvidos, mas também pela necessidade de melhorar os níveis de serviço de atendimento aos clientes. A utilização da Pesquisa Operacional para melhorar os sistemas de transporte pode, então, trazer mais qualidade e confiabilidade aos serviços de entrega beneficiando diretamente o atendimento à sociedade.

A segunda justificativa social diz respeito à redução do impacto ambiental e, conseqüente, melhoria da qualidade de vida da população, gerados pela diminuição da distância total percorrida durante as entregas. Esta otimização, além de diminuir os custos da empresa, gera economia de combustível, reduz a poluição gerada, aumenta a vida útil dos veículos e contribui para reduzir o problema de trânsito atualmente crítico nas grandes cidades.

Academicamente, o presente trabalho traz como contribuição a replicabilidade do método proposto, que pode ser adaptado para outros problemas reais de distribuição, além da aplicação prática de métodos da Pesquisa Operacional, os quais são largamente estudados de maneira teórica com utilização de problemas teste (instâncias da literatura).

1.3 LIMITAÇÕES

Apesar de a empresa analisada atuar em três estados, o trabalho foi limitado ao atendimento no estado do Paraná, pois, em Santa Catarina e São Paulo, o número de clientes atendidos ainda é muito pequeno, sendo utilizado apenas um caminhão, o que não justificaria a utilização de algoritmos das técnicas aqui propostas.

Outro aspecto que pode ser considerado como uma limitação é que não foi aqui estudada a previsão de demanda, dado que o procedimento atual para sua definição já é considerado adequado pela empresa. A filtragem dos clientes a serem atendidos a cada dia foi realizada a partir dos dados de necessidade de reabastecimento já calculados pelo sistema atual. Na sequência foi realizado o agrupamento dos pontos de demanda e a roteirização dentro de cada agrupamento.

A última limitação a ser destacada é a utilização de distâncias Euclidianas para realização dos cálculos. As distâncias reais são de difícil obtenção e passam por constantes modificações. As distâncias Euclidianas, além de já estarem disponíveis, são consideradas boas aproximações das distâncias reais.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além deste primeiro capítulo, tem-se no segundo capítulo a apresentação da descrição do problema, com as informações da empresa e dos clientes, a situação atual da distribuição física e os dados utilizados.

O terceiro capítulo traz o referencial teórico sobre o problema de distribuição física, o problema de agrupamento capacitado, o problema de roteamento de veículos e a meta-heurística *ILS*.

O quarto capítulo descreve a metodologia proposta para a resolução do problema aqui abordado, assim como as técnicas a serem utilizadas em cada etapa do método proposto.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos, para a filtragem dos clientes, agrupamento capacitado, roteirização, e combinação dos métodos. Finalmente, o sexto e último capítulo apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O estudo de caso foi realizado em uma empresa distribuidora de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) a granel que atua principalmente no Paraná, mas também em Santa Catarina e São Paulo. A distribuidora possui uma base de armazenagem de GLP na cidade de Balsa Nova, Região Metropolitana de Curitiba, de onde origina sua distribuição por caminhões-tanque especializados.

A empresa presta dois tipos de serviços, sendo que o primeiro diz respeito à instalação e manutenção de tanques, que são dimensionados de acordo com a área disponível, legislações aplicáveis e necessidade de consumo de cada cliente. Esses tanques podem variar em suas capacidades de 90kg até 20.000kg, e a sua utilização real é de 65%, pois é necessário um mínimo de gás no tanque para pressurização. Os tanques instalados nas propriedades dos clientes são de propriedade da empresa estudada.

O segundo serviço diz respeito à distribuição de gás para clientes que já estão com tanques instalados. São atendidos 436 clientes no estado do Paraná, entre os quais estão edifícios, indústrias, restaurantes, hospitais e outros. Todos estes clientes estão classificados por prioridade e todos devem ser reabastecidos antes que seu estoque de gás se esgote por completo. É a distribuidora que decide quando reabastecer cada cliente em função do histórico de consumo.

Existem restrições de alguns clientes quanto aos dias e horários de entrega, devido à logística do próprio cliente ou às restrições do departamento de trânsito, que proíbe o estacionamento em algumas regiões durante os horários de movimento. Alguns clientes só podem ser atendidos aos sábados, ou apenas em horários restritos como, por exemplo, após as 20:00h.

São utilizados três caminhões-tanque para a distribuição de gás no Paraná, cada um com capacidade total de 10.000kg e capacidade útil de 9.000kg, já que são necessários no mínimo 1.000kg para obtenção de pressurização. A entrega é feita por meio de mangueiras apropriadas para tanques estacionários. A existência de mais de um caminhão faz com que haja a necessidade de agrupar os clientes a serem atendidos, de forma que cada motorista saiba exatamente quais clientes deverá abastecer. A soma total em kg prevista para todos os clientes a serem atendidos, em cada agrupamento, não pode ultrapassar a capacidade útil do caminhão.

Para cada caminhão, a empresa possui uma equipe de um motorista e um ajudante, com carga horária real de trabalho de 6h por dia, 6 dias por semana. A empresa tem seus custos acrescidos quando utiliza horas-extras dos funcionários. Cada agrupamento deve tentar respeitar o tempo limite, considerando que cada reabastecimento leva, segundo a empresa, vinte minutos em média.

2.1 SOLUÇÃO ATUAL ADOTADA PELA EMPRESA PARA A DISTRIBUIÇÃO

O processo de distribuição realizado atualmente pela empresa segue algumas etapas. Primeiramente, com base nos registros históricos de consumo dos clientes, é utilizado um programa que faz uma previsão do consumo diário de cada cliente. Esta previsão, segundo a empresa, tem um índice de 96% de acerto. Conhecendo-se a capacidade útil dos tanques dos clientes, a data do último abastecimento e a previsão de consumo diário é, então, calculada a data provável do término do estoque. Com base nesta data é considerada uma margem de segurança de dois dias de consumo para a programação da próxima entrega.

Uma vez tendo as informações dos clientes e de suas respectivas quantidades a serem reabastecidas nos próximos dias são escolhidos aqueles a serem atendidos em um determinado dia, com base na necessidade e prioridade. As entregas são divididas entre os caminhões disponíveis.

Atualmente, existe um programa computacional que realiza o agrupamento dos clientes pelo método das k -médias, o qual não considera a restrição de capacidade do caminhão, podendo gerar como solução, por exemplo, que um determinado caminhão deva entregar uma quantidade maior do que ele suporta. É necessário então o acompanhamento e ajuste dos agrupamentos por um funcionário com experiência que, na prática, com o auxílio dos resultados do programa, decide os destinos de cada caminhão.

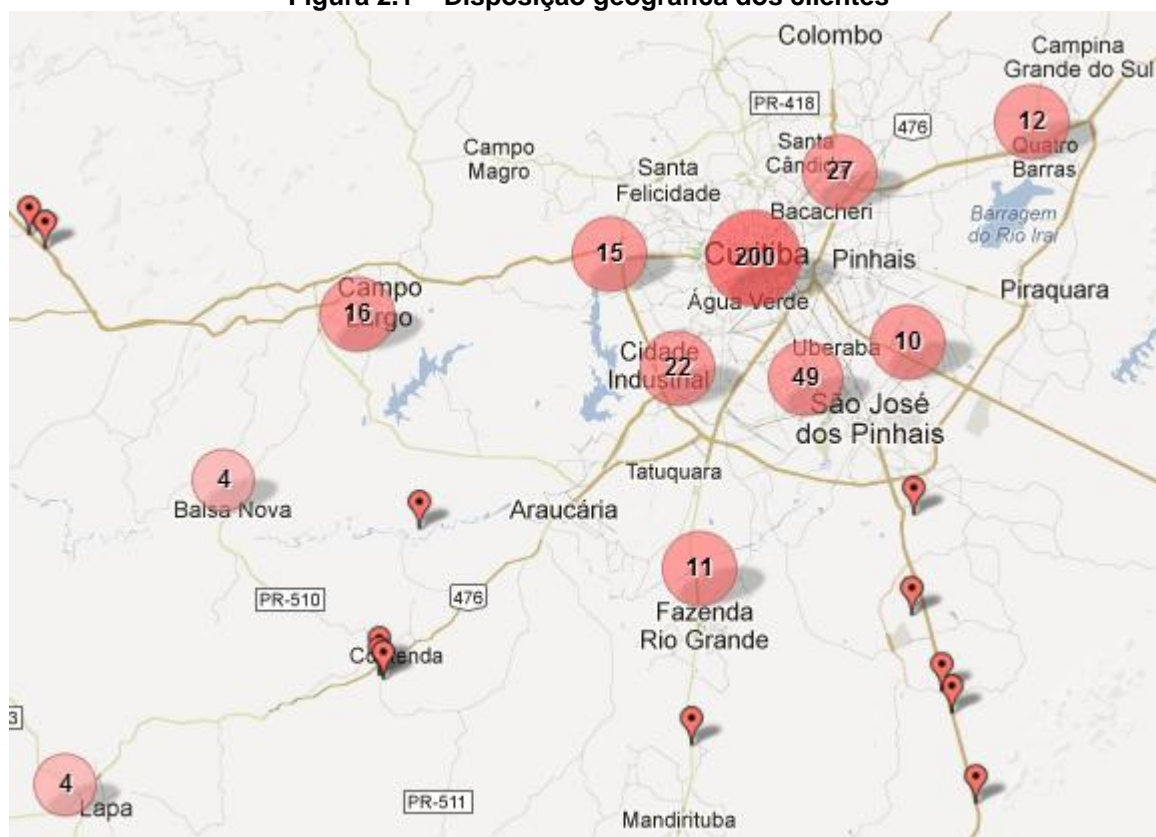
Cada motorista então, sabendo os clientes que deverá atender no dia, escolhe o caminho a ser realizado com base em sua própria experiência, sendo que não é utilizado nenhum método matemático para determinação das melhores rotas.

2.2 DADOS LEVANTADOS

Foram fornecidos pela empresa os dados realizados de novembro de 2011 até o dia 19 de dezembro de 2011. O programa atualmente utilizado pela empresa foi implementado em novembro do mesmo ano, e passou por uma fase de adaptação. Somente os dados referentes ao mês de dezembro, portanto, refletem a utilização da solução atual. Em função das restrições de entrega é necessária uma semana para que todos os clientes tenham oportunidade de serem atendidos no mínimo uma vez. Foram selecionados, então, os dados dos dois ciclos de uma semana disponíveis no mês de dezembro, mais especificamente, do dia 5 ao dia 17 de dezembro de 2011, para serem utilizados nos cálculos e comparações.

Dos 436 clientes com tanques instalados, 382 estavam ativos no decorrer deste período. A figura 2.1 apresenta a disposição geográfica destes clientes. O número dentro de cada círculo representa a quantidade de clientes na região.

Figura 2.1 – Disposição geográfica dos clientes



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Os 382 clientes foram divididos por prioridade, conforme o Quadro 2.1 a seguir. Alguns tanques instalados ficam inativos em determinadas épocas do ano

devido às necessidades dos clientes que podem ocorrer, por exemplo, em função da sazonalidade de seus produtos.

Quadro 2.1 – Clientes atendidos pela empresa aqui analisada

PRIORIDADE	N° DE CLIENTES	TIPO DE CLIENTES
0	7	Hospitais e Grandes Indústrias
1	22	Empresas e Restaurantes de Grande Porte
2	235	Empresas e Restaurantes de Médio Porte
3	96	Empresas e Restaurantes de Pequeno porte
4	4	Condomínios
5	18	Novos Clientes
TOTAL	382	

Fonte: A autora com base nos dados levantados da empresa (2012).

Cada um dos caminhões trabalha 6h por dia, das 6:30h da manhã às 14h, com 1h30min de parada para almoço. Segundo a empresa, cada caminhão pode atender no máximo 18 clientes por dia, e pode distribuir no máximo 9.000kg. Assim, o número máximo total de clientes que podem ser atendidos em um dia é de 54, e a demanda máxima atendida é 27.000kg.

Os clientes que têm o horário de estacionamento limitado aos períodos noturnos ou sábado devem ser atendidos necessariamente aos sábados, uma vez que a empresa não realiza atividades à noite. Existem, ainda, clientes que devem ser atendidos em dias específicos em função de suas próprias limitações. O quadro 2.2, a seguir, mostra as restrições de entrega durante a semana.

Quadro 2.2 – Restrições de dias de entrega dos clientes atendidos pela empresa

RESTRIÇÃO	N° DE CLIENTES	TIPO DE CLIENTE
Nenhuma	348	-----
Segundas	1	Prioridade 3
Sextas	1	Prioridade 2
Sábados	32	02 de prioridade 0; 04 de prioridade 1; 24 de prioridade 2; 02 de prioridade 3
TOTAL	382	

Fonte: A autora com base nos dados levantados da empresa (2012).

A empresa realizou agrupamentos de forma empírica para cada dia estudado com o programa atualmente utilizado que faz uso do método das *k*-médias. A Tabela 2.1, a seguir, mostra a síntese dos resultados obtidos.

Tabela 2.1 – Detalhamento dos atendimentos programados pela empresa

DATA	NÚMERO DE CLIENTES PROGRAMADOS	ATRASOS DE PROGRAMAÇÃO	ATRASO DEVIDO À DATA	MARCADO PARA DATA ERRADA	ATRASOS REALIZADOS	DEMANDA TOTAL (kg)
5/12	53	3	0	1	4	22.167
6/12	54	1	0	2	3	18.472
7/12	45	3	1	1	4	16.345
8/12	52	3	0	6	9	14.160
9/12	54	1	0	11	12	15.768
10/12	51	0	1	0	0	19.705
12/12	49	5	1	8	13	15.534
13/12	54	9	0	11	20	13.536
14/12	49	4	3	3	7	17.735
15/12	48	3	0	6	9	19.319
16/12	51	9	4	6	15	17.728
17/12	48	2	4	0	2	18.847
TOTAL	608	43	14	55	98	187.149

Fonte: A autora com base nos dados levantados da empresa (2012).

A coluna “Número de clientes programados” diz respeito ao número total de clientes programados para atendimento pelos três caminhões. A coluna “Atrasos de Programação” mostra o total de clientes que deveriam ser atendidos até esta data, mas que não entraram na programação. Os clientes que estão em atraso, mas não poderiam realmente entrar na programação por terem suas entregas restritas a outro dia da semana estão na coluna “Atraso Devido à Data”.

Os “Marcados para Data Errada” são aqueles que foram programados, mas não puderam ser atendidos em função das restrições de dia de entrega. Os “Atrasos Realizados” correspondem à soma entre os atrasos de programação e os clientes que foram marcados para a data errada e não foram atendidos, computando assim o total de atrasos ao final do dia. A coluna “Demanda Total” mostra o total em kg, para os três caminhões, previsto para entrega com a programação realizada, considerando apenas os pontos possíveis de entrega.

Na tabela 2.3 é possível observar que, apesar da quantidade total de gás disponível para entrega não ter sido ultrapassada em nenhum dos dias, em 9 dos 12 dias não foi programado o número máximo de clientes para atendimento, ainda que houvesse sempre clientes em atraso. Os agrupamentos gerados pela empresa também apresentam a possibilidade de sugerirem respostas que excedam a capacidade dos caminhões, apesar de nenhum exemplo ter surgido nestes dados.

Outro aspecto que torna a solução atual inadequada é o fato de não considerar as restrições de dias de entrega, realizando agendamentos para clientes

que somente podem ser atendidos em outros dias da semana. Os entregadores não conseguem concluir a entrega, e o cliente é reprogramado diversos dias consecutivos, até que o atendimento seja efetuado.

Existe ainda uma falha em relação à programação dos novos clientes, pelo fato de ainda não terem histórico de consumo suficiente para gerar uma previsão de demanda próxima da realidade. Tais clientes são programados com uma frequência muito alta de atendimento, em média uma vez a cada três dias, apesar de serem considerados de baixa prioridade pela empresa, ocupando a capacidade que poderia ser usada para regularizar clientes em atraso.

É possível verificar, na tabela 2.2 a seguir, que a quantidade efetivamente entregue pela empresa foi menor que a quantidade programada, sendo que, em média, foram distribuídos 35% menos quilogramas de gás do que o previsto. Esta diferença acontece devido à programação de clientes que não podem ser atendidos e à programação frequente de novos clientes, que, muitas vezes, ainda estão com seus tanques cheios e não recebem mais produto.

Tabela 2.2 – Comparação entre as quantidades programadas e vendidas

DATA	DEMANDA PROGRAMADA (kg)	DEMANDA REALIZADA (kg)	DIFERENÇA (%)
05/dez	22.167	6.523	-71%
06/dez	18.472	13.310	-28%
07/dez	16.345	9.129	-44%
08/dez	14.160	11.306	-20%
09/dez	15.768	6.959	-56%
10/dez	19.705	6.711	-66%
12/dez	15.534	12.205	-21%
13/dez	13.536	9.947	-27%
14/dez	17.735	10.838	-39%
15/dez	19.319	11.264	-42%
16/dez	17.728	14.271	-20%
17/dez	18.847	9.611	-49%
MÉDIA			-35%

Fonte: A autora (2012).

A figura 2.2, a seguir, mostra o agrupamento programado pela empresa para o dia 08/12/2011. Os agrupamentos dos demais dias podem ser encontrados no apêndice A. Em vermelho está a localização da empresa, e nas cores verde, azul e amarelo estão os pontos de cada um dos três grupos.

Figura 2.2 – Clientes atuais e agrupamento atual para 08.12

Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Visualmente fica clara a necessidade de melhorar a qualidade dos agrupamentos. É possível observar que o grupo azul, por exemplo, “corta” o grupo verde ao meio, de forma que diversos pontos do grupo verde estão, na realidade, mais próximos dos grupos azul e amarelo, e não da maior parte dos demais pontos do próprio grupo verde. Esta solução só poderia ser a ótima se as restrições de capacidade, as quais não estão sendo consideradas no método atual, impusessem a escolha destes pontos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico inclui a distribuição física, em especial o estoque gerenciado pelo fornecedor, o agrupamento capacitado, a roteirização de veículos e o algoritmo *ILS (Iterated Local Search)*.

3.1 DISTRIBUIÇÃO FÍSICA

O sucesso de qualquer cadeia de suprimentos está estreitamente relacionado à boa utilização do transporte, o qual significa mover o produto de um local para outro e exerce papel crucial em função dos produtos raramente serem fabricados e consumidos no mesmo local (CHOPRA e MEINDL, 2003). O objetivo do transporte é deslocar espacialmente o carregamento, mantendo a integridade da carga e respeitando os prazos de entrega (ALVARENGA e NOVAES, 2000).

Christopher (2010) afirma que o objetivo de qualquer sistema logístico é o de satisfazer os clientes e que o gerenciamento logístico causa importante impacto no valor percebido pelo cliente, o qual define vantagem competitiva. Este valor percebido é constituído em grande parte pela distribuição física, a qual consiste em viabilizar a disponibilidade de produto. O autor afirma que a falta de estoque pode causar impacto negativo na percepção e no comportamento do cliente, enquanto um alto nível de serviço melhora a retenção do cliente e, também, aumenta a possibilidade de desenvolvimento de novos clientes.

Bowersox e Closs (2010) colocam que qualidade, em logística, é sinônimo de confiabilidade, o que torna a capacidade de manter níveis de disponibilidade de estoque fundamental. Alvarenga e Novaes (2000) afirmam que a concorrência entre as empresas exige melhores níveis de serviço, que podem ser traduzidos, entre outros, pela confiabilidade e segurança. Para os autores, quanto maior o nível de serviço em transportes, mais caro ele será para a empresa.

Segundo Ballou (2006), o transporte é a atividade que absorve a maior parcela de custos na cadeia logística, podendo chegar a dois terços do custo logístico total. Chopra e Meindl (2003) afirmam que o custo de transporte é diretamente proporcional ao grau de responsividade em relação ao cliente. Quanto maior a rapidez de atendimento, maiores os custos.

Alvarenga e Novaes (2000) afirmam que a escolha do período de atendimento aos clientes depende de dois fatores antagônicos: de um lado, o atendimento aos clientes, que se sentem melhor atendidos com entregas mais frequentes; de outro, o custo de transporte para o fornecedor. Os autores colocam que os custos diretos envolvidos em transporte são: depreciação do veículo; remuneração de capital; salários e gratificações dos funcionários; seguro; licenciamento; combustível, lubrificação, pneus e manutenção.

Segundo Bowersox e Closs (2010), distância é um dos principais fatores no custo de transporte, uma vez que afeta diretamente os custos variáveis como combustível e manutenção. Para Daibert (2009), um dos custos mais difíceis de serem mensurados, e que causa maior impacto na imagem da empresa perante os clientes é o custo de falta de produto.

Bowersox e Closs (2010) colocam que a análise de transportes tem por objetivo obter o melhor uso de veículos e atender às necessidades dos clientes. Segundo os autores, algumas questões típicas desta análise são: como as entregas devem ser agrupadas para formar as rotas? Qual a melhor sequência de entrega a clientes? Como as restrições de tempo de entrega serão impostas pelos clientes?. Estas questões serão estudadas nos tópicos seguintes.

3.1.1 Estoque Administrado pelo Fornecedor e o Cronograma de Entrega

No conceito de *Vendor-Managed Inventory (VMI)*, ou estoque administrado pelo fornecedor, este é responsável por todas as decisões referentes ao estoque de produto do cliente. A decisão de reabastecimento passa a ser então do fornecedor, que precisa ter acesso às informações de demanda do cliente para que possa tomar esta decisão (CHOPRA e MEINDL, 2003).

Segundo Christopher (2010), o fornecedor assume a responsabilidade de manter o estoque dentro dos limites superior e inferior que o cliente deseja manter disponível. O autor coloca que entre as vantagens do *VMI* para o cliente está a diminuição do risco de falta de estoque e para o fornecedor o planejamento e programação mais eficiente da produção e distribuição, melhorando a utilização da capacidade. O nível de desempenho de entrega do fornecedor é melhorado (DAIBERT, 2009).

A utilização de sistemas de distribuição desse tipo ganhou impulso com a disseminação da tecnologia de troca de dados por via eletrônica (EDI - *Electronic Data Interchange*), que é de uso comum no *VMI* e ajuda o fornecedor a manter-se informado dos níveis de estoques nos clientes pelos quais é responsável (BALLOU, 2006)

A resolução do problema do *VMI* envolve três decisões inter-relacionadas: quando atender cada cliente, quanto fornecer de produto, e que rota utilizar no atendimento. As decisões podem ser modeladas de duas formas: modelo de frequência de atendimento, em que as entregas obedecem a uma periodicidade; e modelo de instante de atendimento, no qual os momentos de entrega são variáveis de decisão (ZNAMENSKI, 2006).

Segundo Znamenski e Cunha (2003), o problema de estoque-roteirização com demanda determinística, o qual é uma combinação entre o problema de reposição de estoques e o problema de roteirização de veículos, tratado como modelo de instante de atendimento, é especialmente encontrado nos sistemas logísticos *VMI*.

Chopra e Meindl (2003) afirmam que o cronograma de entrega, no qual se deve decidir quais clientes serão visitados, é uma das decisões operacionais mais importantes relacionadas ao transporte, que objetiva eliminar falhas no serviço. Ao designar clientes para atendimento, além de atender às demandas dos mesmos, deseja-se maximizar a economia. Há dois princípios que norteiam o gerenciamento de transporte: a economia de escala, obtida com a diminuição do custo de transporte por unidade, e a economia de distância (BOWERSOX e CLOSS, 2010).

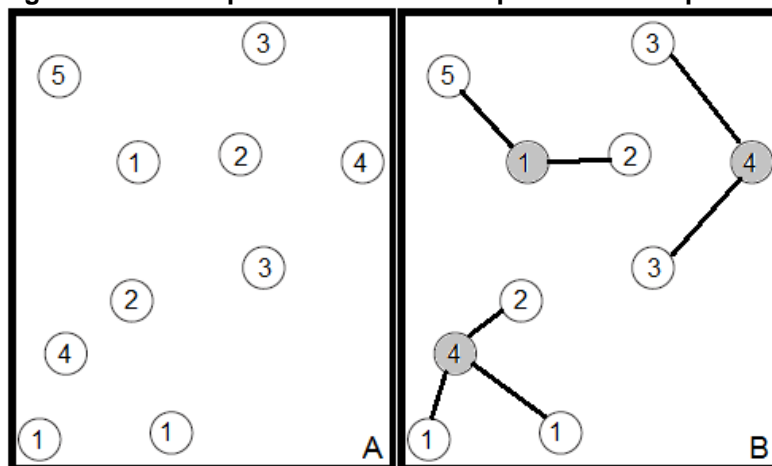
3.2 PROBLEMA DE AGRUPAMENTO CAPACITADO

O problema das p -medianas capacitado (PPMC), também conhecido como problema de *clusterização* (ou agrupamento) capacitado, é aquele no qual dado um conjunto de n pontos (clientes) e suas respectivas demandas, estes pontos devem ser divididos em p agrupamentos, de tal modo que a capacidade de cada conjunto não seja ultrapassada e que a soma das distâncias entre os pontos e a mediana de seus respectivos *clusters* seja minimizada (ANDRADE e CUNHA, 2011).

A Figura 3.1, a seguir, ilustra o PPMC. No quadro A estão os pontos a serem distribuídos em 3 grupos, e a respectiva demanda de cada ponto. Se cada grupo

tem uma capacidade máxima de 10, uma forma de realizar os agrupamentos está ilustrada no quadro B, no qual os pontos em cinza passam a representar as medianas.

Figura 3.1 – Exemplo do Problema das p-Medianas Capacitado



Fonte: A autora (2012).

O PPMC é utilizado em diversas situações, tais como *design* de rede de distribuição, roteirização de veículos, divisão territorial para vendas, determinação de distritos políticos e projetos de redes de comunicação de computador. Esta extensa utilização justifica a existência de diversos trabalhos acerca do assunto na literatura, os quais buscam melhores soluções para este tipo de problema (FLESZAR e HINDI, 2008).

O PPMC é considerado um problema NP-difícil, de complexidade combinatorial, o que pode inviabilizar o uso de métodos exatos para a sua resolução, principalmente em problemas de maiores dimensões, os quais são aplicações mais comuns no mundo real. Diante disso, utilizam-se métodos heurísticos (FRANÇA, SOSA e PUREZA, 1999).

Heurísticas são técnicas que encontram boas soluções, sem garantir o ótimo global, com custo computacional razoável, especialmente utilizadas para problemas de alta complexidade computacional. Meta-heurísticas são heurísticas de uso geral, as quais podem ser adaptadas para serem utilizadas em qualquer tipo de problema. (BRITO *et al.*, 2008). Diversas heurísticas e meta-heurísticas foram propostas para resolver o PPMC nos últimos anos, alguns destes trabalhos serão relatados a seguir.

Furtado (1998) propôs um Algoritmo Genético Construtivo e utilizou as instâncias propostas por Osman e Christofides (1994) para testar a técnica. As

soluções foram obtidas em pequenos intervalos de tempo e, em geral, ficaram a menos de 1% da melhor solução conhecida.

França, Sosa e Pureza (1999) utilizaram o Algoritmo Busca Tabu, e também compararam com as instâncias propostas por Osman e Christofides (1994), tendo obtido resultados melhores que os conseguidos pelos autores originais.

Baldacci *et al.* (2002) utilizaram uma técnica de partição de conjuntos, com combinação de duas heurísticas e, além de utilizarem as instâncias propostas por Osman e Christofides (1994), criaram novas instâncias com problemas de dimensões maiores. O método proposto foi considerado efetivo.

Lorena e Senne (2003) utilizaram busca local com relaxação Lagrangeana. Os resultados obtidos para as instâncias propostas por Osman e Christofides (1994) foram superiores aos de França, Sosa e Pureza (1999), além de terem sido alcançados em tempo computacional inferior.

Lorena e Senne (2004) propuseram um método de geração de colunas com relaxação Lagrangeana. Foram utilizadas informações geográficas da cidade de São José dos Campos para os testes computacionais. O método foi considerado bom e observou-se que, quanto menor o número de medianas para uma mesma quantidade de nós, maior o tempo computacional necessário.

Ceselli e Righini (2005) propuseram a utilização de um *Branch-and-Price*, e utilizaram as instâncias propostas por Osman e Christofides (1994), além das instâncias adicionais propostas por Baldacci *et al.* (2002), para realização dos testes. O método proposto foi considerado efetivo para resolução de problemas de pequeno porte, porém não conseguiu bons resultados para problemas grandes, mesmo utilizando tempo computacional superior à uma hora.

Scheuerer e Wendolsky (2006) também utilizaram as instâncias propostas por Osman e Christofides (1994) e as de Baldacci *et al.* (2002). Os autores utilizaram busca dispersa e obtiveram resultados superiores aos de Baldacci *et al.* (2002), até então considerados os melhores da literatura.

Fleszar e Hindi (2007) utilizaram *Variable Neighbourhood Search (VNS)*, e para as mesmas instâncias anteriormente citadas obtiveram soluções melhores, porém utilizando tempo computacional superior ao dos outros autores.

Brito *et al.* (2008) fizeram uma proposta de utilização do algoritmo *ILS*, e seus resultados não foram comparados com outros da literatura. Foi utilizada a base de dados do IBGE para formar grupos de 80 a 150 pontos. Os resultados foram

comparados com aqueles obtidos pela formulação matemática com processamento máximo de 6h. As soluções do *ILS* foram melhores de que as da formulação, mesmo com tempo computacional muito inferior, se mostrando uma boa solução para o problema das *p*-medianas, principalmente para problemas de dimensões elevadas.

Boccia *et al.* (2008) utilizaram o algoritmo *Cut-and-Branch* e compararam os resultados com as instâncias de Osman e Christofides (1994), de Baldacci *et al.* (2002) e de Lorena e Senne (2004). O método foi considerado efetivo por conseguir resolver problemas de grande porte, que outros métodos testados na literatura, até então, não resolviam.

Stefanello e Müller (2009) propuseram o Modelo *P* (método exato com inclusão de restrições redundantes para diminuir o tempo computacional) e Modelo Reduzido (eliminando heurísticamente variáveis com poucas chances de estarem na solução ótima), e utilizaram as instâncias de Lorena e Senne (2004) para realização dos testes. O Modelo Reduzido foi mais eficaz que o Modelo *P* em termos de tempo computacional, e obteve resultados satisfatórios tanto para problemas de pequeno porte quanto para problemas maiores. O Modelo *P* não é viável para problemas de grande porte.

Andrade e Cunha (2011) fizeram uma proposta utilizando colônia artificial de abelhas e utilizaram as instâncias de Lorena e Senne (2004) para comparação. Os resultados foram considerados satisfatórios por serem da mesma grandeza dos resultados obtidos por outros autores. Como vantagem destacou-se a utilização de poucos parâmetros.

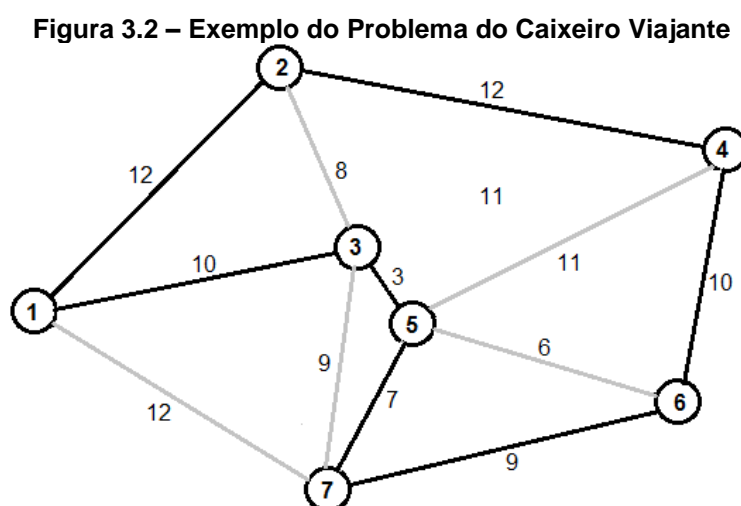
3.3 PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO

Brasileiro e Lacerda (2008) colocam que ao roteirizar veículos tem-se como meta determinar as rotas de cada veículo, atendendo todos os pontos de entrega, respeitando às restrições de movimentação de veículos e capacidade dos caminhões, com o menor custo possível em termos de quilometragem e tempo.

Cunha (2000) afirma que o interesse pela aplicação de modelos de roteirização a problemas reais é crescente em função de alguns fatores: maiores exigências dos clientes com relação a prazos de entrega e horários de atendimento; agravamento dos problemas de trânsito, como circulação e estacionamento; e busca por eficiência gerada pelo aumento da competição de mercado. O autor cita, entre

os principais tipos de problemas de roteirização pura, o problema do caixeiro viajante, o problema do carteiro chinês, o problema de múltiplos caixeiros viajantes, problemas de roteirização em nós e problemas de roteirização em arcos.

O problema do caixeiro viajante (PCV) trata de um vendedor que deseja sair de sua sede, visitar um número de cidades, passando por cada local uma única vez e retornar à sede, percorrendo a menor distância possível (WILSON e WATKINS, 1989). Segundo Boaventura Netto (2006), o PCV é o problema de determinação de um percurso Hamiltoniano fechado de valor mínimo, o qual tem grande importância por apresentar diversas aplicações práticas, como programação de produção e programação de rotas de distribuição. A Figura 3.2 exemplifica o PCV.



Fonte: Adaptado de Hillier e Lieberman (2010).

Supondo que um vendedor deseje sair da cidade 1, passar por todas as demais cidades uma única vez e retornar à cidade 1, percorrendo o menor caminho possível, sendo as distâncias dos caminhos existentes representadas juntos aos seus arcos. A solução ótima seria a representada em preto, com uma distância total igual a 63.

Assim como o problema de agrupamento capacitado, o PCV é considerado um problema NP-difícil. Segundo Hillier e Lieberman (2010), para um problema com n cidades e uma ligação entre cada par de cidades existem $(n - 1)!/2$ rotas viáveis, ou seja, para um problema com 19 pontos (uma base e 18 clientes), existem aproximadamente $3,2 * 10^{15}$ rotas a serem analisadas. O fato de a dificuldade aumentar conforme aumenta o número de pontos gera a necessidade da utilização de métodos heurísticos e meta-heurísticos.

Existem diversos métodos heurísticos para resolver o PCV que são enquadrados em procedimentos de construção de rotas (que geram soluções viáveis) ou procedimentos de melhorias de rotas (que melhoram as soluções viáveis existentes). Como exemplos podem ser citados os algoritmos de inserção do mais próximo ou de inserção do mais distante, e as heurísticas de troca, como *2-opt* e *3-opt*, nas quais se eliminam arcos do circuito e se reconectam estes caminhos em ordens diferentes (BOAVENTURA NETTO, 2006).

Diversas meta-heurísticas já foram utilizadas para resolver o PCV, entre as quais estão *Ant System*, *Simulated Annealing*, Algoritmo Genético, *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)* e Busca Tabu (BENEVIDES, 2011). Segundo Lourenço *et al.* (2002), o algoritmo *ILS* já foi utilizado neste contexto diversas vezes, sendo que algumas das primeiras utilizações do algoritmo foram justamente com o propósito de resolver o problema do caixeiro viajante, como a realizada por Baum (1986).

3.4 ALGORITMO *ILS*

O algoritmo *ILS (Iterated Local Search)*, também chamado Busca Local Iterativa, é baseado no fato de algoritmos de busca local ficarem facilmente “presos” em ótimos locais, ou seja, em soluções viáveis que não são as melhores soluções globais para o problema. Ao invés de reiniciar a busca local a partir de uma solução nova, o *ILS* modifica a solução atual para uma distante do ótimo local procurando por um novo ótimo local, melhor que o anterior, aumentando a chance de se encontrar a melhor solução possível para o problema (STÜTZLE e HOOS, 1999).

Lourenço *et al.* (2002) afirmam que, por se tratar de uma meta-heurística simples, robusta, eficiente e de fácil implementação, o algoritmo *ILS* é considerado muito competitivo. Diversos problemas combinatoriais já foram resolvidos utilizando o *ILS*, que obteve em muitos casos os melhores resultados conhecidos da literatura. Os Problemas do Caixeiro Viajante e de sequenciamento de atividades, por exemplo, foram amplamente estudados com utilização desta meta-heurística.

O princípio do *ILS* é aplicar sucessivamente perturbações e busca local à solução atualizada. Para isso são utilizados quatro procedimentos (SUBRAMANIAN, 2008; PENNA, SUBRAMANIAN e OCHI, 2011; RIBEIRO *et al.*, 2008; LOURENÇO *et al.*, 2002):

- i. Geração da solução inicial: a construção pode ser realizada a partir de um procedimento aleatório ou considerando uma heurística (como busca gulosa), sendo que a segunda opção é preferível em relação à primeira por gerar soluções de qualidade melhor e por utilizar menos tempo de processamento nas etapas posteriores do algoritmo.
- ii. Perturbação: é feita uma modificação na solução atual de forma a gerar um novo ponto de partida, com o objetivo de escapar do ótimo local. A força da perturbação é medida pelo número de componentes da solução que são modificados, sendo que cada tipo de problema pode ter uma força adequada diferente.
- iii. Busca Local: é escolhido um procedimento para “refinar” a solução obtida após a geração da solução inicial e também após as perturbações. De maneira geral, quanto maior a qualidade do algoritmo escolhido para este procedimento, maior será o tempo computacional utilizado pelo *ILS*. Assim, é preciso chegar ao equilíbrio entre os resultados necessários e o tempo disponível para obtê-los. É necessário ainda haver um cuidado para que o algoritmo de busca local escolhido não seja tão bom que sistematicamente desfaça a perturbação gerada.
- iv. Critério de aceitação: Determina-se por qual solução se deve continuar a busca. Um critério razoável é forçar a melhor solução, aceitando o ótimo local gerado pela perturbação apenas se este resultar em custo menor que o ótimo local anterior.

Brito *et al.* (2008) colocam que o êxito desta meta-heurística está diretamente relacionado à escolha dos procedimentos, os quais devem ser adequados a cada tipo de problema. As perturbações não podem ser pequenas demais (a estrutura da solução seria pouco alterada, podendo gerar um resultado preso a um ótimo local) e nem grandes demais (as soluções geradas seriam aleatórias).

A Figura 3.3, a seguir, mostra o procedimento geral da meta-heurística *ILS*. O algoritmo parte de um ótimo local (solução inicial com busca local) e entra em um *loop* de busca por melhores ótimos locais: com o uso de perturbação e busca local é gerada uma nova solução, a qual substitui ou não o ótimo local anterior, dependendo

dos critérios de aceitação estabelecidos. O *loop* continua até que um critério de parada seja atingido (RIBEIRO *et al.*, 2008).

Figura 3.3 – Procedimento ILS

Procedimento ILS

1. $s_0 \leftarrow \text{GeracaoSolucalInicial};$
2. $s \leftarrow \text{BuscaLocal}(s_0);$
3. enquanto (critério de parada não obedecido) faça
4. $s' \leftarrow \text{Pertubacao}(s, \text{historico});$
5. $s'' \leftarrow \text{BuscaLocal}(s');$
6. $s \leftarrow \text{CriterioAceitacao}(s, s'', \text{histórico});$
7. fim-enquanto;

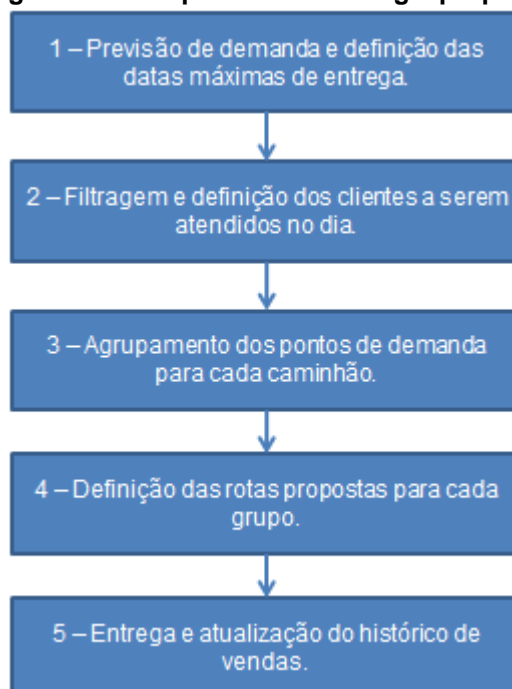
Fim ILS

Fonte: Subramanian (2008)

4 METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta para a resolução do problema de distribuição física da empresa, apresentado no capítulo 2, consiste, basicamente, de cinco etapas sequenciais, conforme a Figura 4.1, a seguir.

Figura 4.1 – Etapas da metodologia proposta



Fonte: A autora (2012).

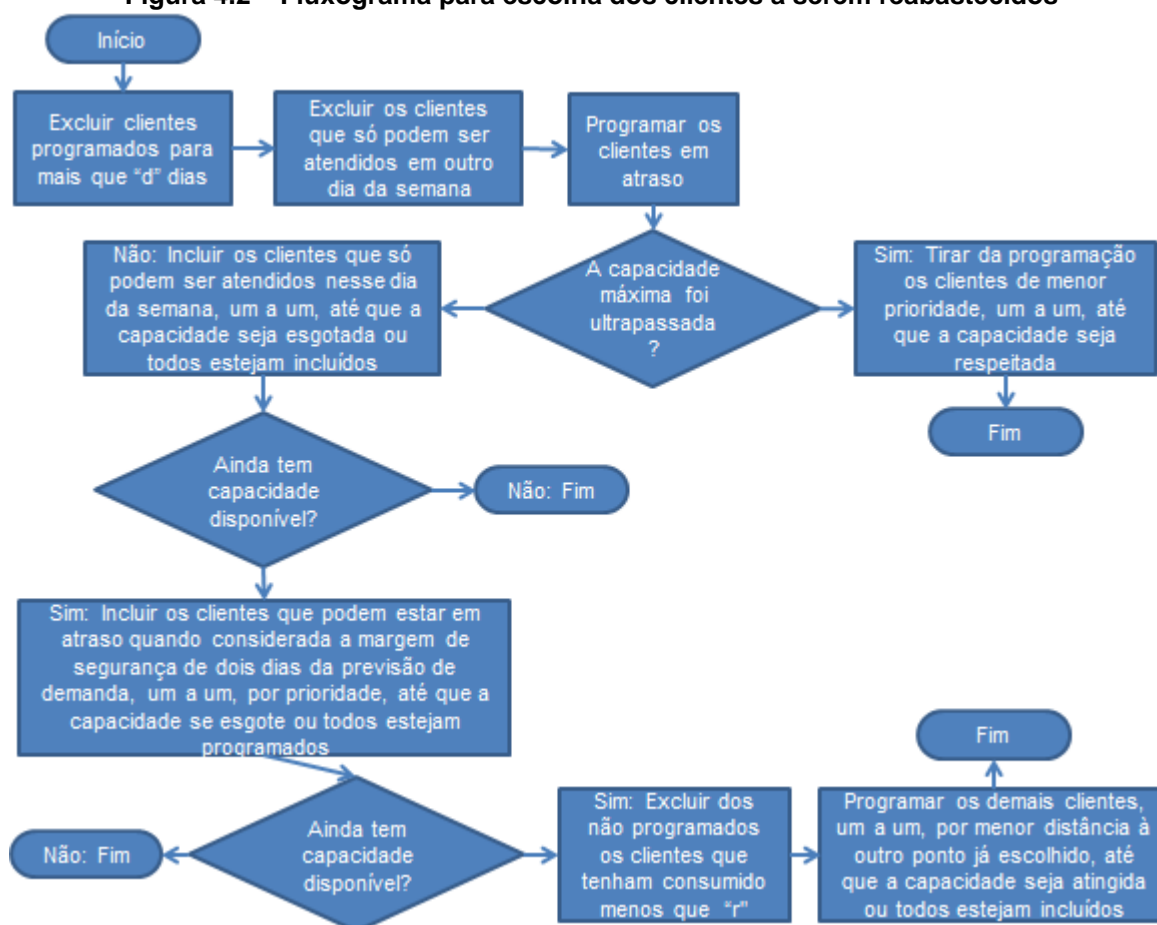
Este trabalho abordou as etapas 2 a 4, ou seja, a filtragem dos clientes para atendimento, o agrupamento dos pontos de demanda selecionados e a proposta de uma sequência de atendimento para cada grupo. As etapas de previsão de demanda, entrega e atualização do histórico de vendas não foram abordadas em função de a situação atual ser considerada satisfatória.

4.1 FILTRAGEM DOS CLIENTES

As falhas no serviço de entrega na empresa estudada se caracterizam pelos atrasos de entrega, os quais podem significar falta de estoque para os clientes, e pela programação de clientes que não podem ser atendidos no dia da semana específico em função de suas restrições, que geram desperdício de tempo e distância percorrida.

Com o objetivo de melhorar o nível de serviço oferecido aos clientes, reduzindo o número de falhas, e simultaneamente aproveitar a maior vantagem do sistema *VMI* para o vendedor, que consiste em permitir melhor planejamento e programação da distribuição, foi aqui proposto um algoritmo para se definir quais clientes atender a cada dia. Tal algoritmo encontra-se sintetizado no fluxograma apresentado na Figura 4.2 a seguir.

Figura 4.2 – Fluxograma para escolha dos clientes a serem reabastecidos



Fonte: A autora (2012).

Têm-se como informações iniciais de cada cliente, provenientes da etapa de previsão de demanda, a data prevista para reabastecimento; a quantidade a ser entregue em caso de atendimento no dia do planejamento; a prioridade e as restrições de entrega; distâncias entre todos os pontos, além da capacidade do tanque. Os clientes novos, que ainda não têm uma previsão de consumo adequada, foram programados para reabastecimento a cada 10 dias.

Visando garantir que o método possa continuar sendo utilizado no futuro, mesmo em caso de expansão dos atendimentos, e ainda objetivando dar flexibilidade para que a empresa possa realizar a escolha de quais clientes atender por dia conforme sua conveniência, o método considera também alguns parâmetros controlados pela empresa:

- c : Número de caminhões.
- p : Número máximo de clientes atendidos por caminhão.
- d : Número máximo de dias de adiantamento de programação, para evitar que clientes com demanda para uma data muito distante sejam incluídos.
- r : Reabastecimento mínimo do tanque, para que a empresa possa atender apenas clientes que já tenham consumido um percentual mínimo da capacidade dos seus tanques.

Uma vez tendo todas estas informações, são excluídos dos clientes programáveis os que só podem ser atendidos em outro dia da semana e aqueles que têm data prevista de entrega para mais que o número de dias máximo estipulado pela empresa.

Em seguida, são programados os clientes considerados em atraso real, que são aqueles que estão em atraso superior à margem de segurança de dois dias dada pela previsão de demanda. Estes são os clientes com maior risco de ficar sem produto. No caso desta inclusão, se a capacidade em número máximo de clientes atendidos e/ou a capacidade em peso máximo para entrega tiverem sido ultrapassadas, são retirados da programação os clientes de menor prioridade, e em caso de empate deste critério, os de menor atraso.

Se após a inclusão dos clientes em atraso real ainda houver capacidade ociosa, são incluídos os clientes que têm data de entrega para os próximos dias, porém, só podem ser atendidos neste dia da semana. São incluídos um a um, por data de entrega mais próxima, até que a capacidade seja atingida ou todos estejam programados. Isto evita que aconteçam atrasos reais nos outros dias da semana.

Havendo ainda capacidade disponível, os clientes que podem estar em atraso devido a falhas na previsão de demanda são incluídos, ou seja, é considerada a margem de segurança de dois dias determinada pela empresa. Estes clientes são programados um a um, por ordem de prioridade e, em caso de empate, por ordem de menor margem de segurança disponível, até que a capacidade seja atingida ou

todos estejam incluídos. Todos os passos realizados até aqui objetivam aumentar a confiabilidade do sistema de entrega, evitando falta de estoque para os clientes.

Após todos os clientes em atraso e todos os que potencialmente ficariam em atraso real durante a semana estarem programados, se ainda houver capacidade, serão excluídos dos programáveis aqueles que não tenham consumido o percentual mínimo de seus tanques estipulado pela empresa, evitando que os atendimentos a cada cliente sejam realizados em número muito superior ao mínimo necessário. Este passo faz com que a economia de escala seja aumentada, uma vez que evita que distâncias sejam percorridas para entregar quantidades muito pequenas.

São, então, programados os demais clientes, um a um, escolhendo sempre, entre os programáveis, o que tenha menor distância possível de outro ponto já incluído, até que a capacidade se esgote ou todos estejam programados. Este passo aumenta a economia de distância, e contribui para aumentar a economia de escala, uma vez que proporciona melhor utilização da capacidade disponível.

Para realização dos testes de comparação com a situação atual foram utilizados os seguintes parâmetros:

- $c = 3$: Mesmo número utilizado na situação real a ser comparada.
- $p = 18$: Mesmo número utilizado na situação real a ser comparada.
- $d = 7$: Todos os clientes que têm restrições de atendimento podem ser atendidos, no mínimo, uma vez por semana. Por isto, é necessária a opção de adiantamento de programação de no mínimo 7 dias para garantir que sejam evitados atrasos.
- $r = 0,6$ de segunda a quinta e $r = 0,5$ sextas e sábados: De segunda a quinta-feira, os clientes precisarão ter consumido no mínimo 60% da capacidade dos seus tanques para serem reabastecidos. Sextas e Sábados, o valor mínimo será menor, 50%, para que sejam adiantados os atendimentos de mais clientes e evitados atrasos em função do não funcionamento da empresa aos domingos.

4.2 AGRUPAMENTO DOS PONTOS DE DEMANDA

O agrupamento capacitado foi realizado tanto pelo método exato, quanto com utilização do algoritmo *ILS*, e os resultados foram comparados.

4.2.1 Método Exato

O método exato para resolução do problema das p -medianas capacitado utilizado neste trabalho, e apresentado a seguir, foi baseado na formulação proposta em Lorena e Senne (2004).

$$v(F) = \text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1; i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{jj} = p \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} q_i x_{ij} \leq Q x_{jj}; j \in N \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} \leq P x_{jj}; j \in N \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}; i \in N, j \in N \quad (6)$$

onde $N = \{1, \dots, n\}$ é o conjunto de pontos a serem alocados, os quais também são possíveis medianas; p medianas serão alocadas, ou seja, p grupos serão formados; q_i é a demanda do ponto i ; Q é a capacidade total de carga de cada agrupamento, neste caso a capacidade de cada caminhão; P é a capacidade máxima total em número de pontos de cada grupo; d_{ij} é a distância do ponto i ao ponto j ; x_{ij} é variável binária de alocação, ou seja, se $x_{ij} = 1$ o ponto i está alocado à mediana no ponto j ; caso contrário, $x_{ij} = 0$; se $x_{jj} = 1$, o ponto j é uma mediana; caso contrário, $x_{jj} = 0$.

A equação (1), referente à função objetivo, faz com que a distância total dos pontos às suas medianas seja minimizada. A equação (2) faz com que cada ponto seja alocado somente a uma mediana (ou a um único grupo). A equação (3) faz com que a quantidade exata de grupos requerida seja respeitada. As equações (4) e (5) impõem que as capacidades de cada grupo, tanto em termos de quantidade de produto a ser distribuída, quanto em termos de número máximo de clientes para atendimento sejam respeitadas. A equação (6) impõe que as variáveis sejam binárias.

Este método foi aplicado para três situações diferentes do estudo de caso. Primeiramente, aplicou-se à situação atual da empresa. Para cada dia foi feita a formulação de cada grupo considerando $p = 1$, ou seja, formando apenas o grupo

originalmente proposto pela empresa, com o objetivo de saber o valor da função objetivo, representado pela distância total entre os pontos de cada grupo e suas medianas.

O método exato foi então aplicado para cada dia, a todos os pontos de demanda escolhidos pela empresa, considerando $p = 3$, ou seja, formando novos grupos que seriam atendidos por cada um dos 3 caminhões. A comparação desses resultados com os da aplicação anterior sugere a diferença de qualidade entre os agrupamentos atuais e a situação ideal.

Finalmente, o método exato foi aplicado aos pontos de demanda sugeridos após a filtragem dos clientes, sempre utilizando o menor valor possível de p , ou seja, o menor número de caminhões que a demanda total permite utilizar. A comparação desta aplicação com a referente à situação atual mostra a diferença de qualidade entre os métodos combinados (de escolha de clientes e de agrupamento) utilizados e propostos.

4.2.2 Algoritmo *ILS*

O algoritmo *ILS* para o problema das p -medianas capacitado utilizado neste trabalho foi baseado na proposta de Brito *et al.* (2008). Vale lembrar que a função objetivo para este problema de agrupamento, a qual busca minimizar a distância total entre os pontos e suas medianas, está representada na equação (1).

A base do algoritmo é a mesma apresentada na Figura 3.3, no capítulo 3. Inicia-se buscando uma solução inicial, a qual passa pelo algoritmo de busca local. Entra-se então em um *loop* de perturbação, busca local e critério de aceitação, até que o critério de parada seja alcançado. Os quatro procedimentos do *ILS*, que foram aplicados ao problema das p -medianas capacitado, estão descritos a seguir.

4.2.2.1 Solução Inicial

- Gerar q soluções iniciais S_0 , cada uma com k -medianas, escolhidas aleatoriamente a partir dos n objetos.
- Para cada solução S_0 , alocar os $(n-k)$ objetos restantes à sua mediana $med_i \in M, i \in \{1, \dots, k\}$ mais próxima, considerando a minimização das

distâncias, e não ultrapassando as capacidades de cada agrupamento, tanto em número de pontos quanto em demanda total.

- Escolher, dentre as q soluções, a solução S_0 de menor custo, considerando a minimização das distâncias entre os pontos e suas medianas.

4.2.2.2 Perturbação

- Considerando a solução S , que pode ser advinda da solução inicial ou após aplicação do critério de aceitação dentro do *loop*, selecionar aleatoriamente, dentre os $(n-k)$ objetos restantes, um objeto o_j e selecionar aleatoriamente uma mediana med_i dentre as k medianas que compõem S .
- Substituir a mediana med_i pelo objeto o_j para obter S' .
- Recalcular o valor da função (distâncias dos pontos até as medianas) considerando a nova mediana.

4.2.2.3 Busca Local

- Selecionar, em S_0 ou em S' , duas medianas, med_r e med_s , ($1 \leq r \leq k, 1 \leq s \leq k, r \neq s$).
- Selecionar, aleatoriamente, um objeto $o_a \in med_r$ e um objeto $o_b \in med_s$ e trocá-los entre si. Efetuar tal procedimento de troca l vezes, objetivando reduzir o valor da função objetivo.
- Realizar tentativas de substituir cada mediana med_i ($1 \leq r \leq k$) por outra mediana (considerando como possíveis novas medianas apenas os $(n-k)$ objetos que não são medianas na solução atual) objetivando reduzir o valor da função objetivo.

4.2.2.4 Critério de Aceitação

- Se $v(S'') < v(S)$, então substitua S por S'' , ou seja, aceita-se a melhor solução.

4.2.2.5 Aplicações

Para a geração da solução inicial foi utilizado $q = 30$, ou seja, o número de soluções iniciais aleatórias geradas para escolha de uma solução inicial a ser utilizada foi igual a 30. O critério de parada do *loop* foi a realização do mesmo 20 vezes, como realizado em Brito *et al.* (2008).

Este algoritmo *ILS* foi aplicado às instâncias da literatura descritas no Quadro 4.1, a seguir, que incluem agrupamentos de dimensões distintas com quantidades de medianas variáveis. Os resultados obtidos foram comparados com os melhores encontrados na literatura, de forma a avaliar a qualidade do algoritmo para problemas de diferentes tamanhos.

Quadro 4.1 – Instâncias da literatura para o problema das p-medianas capacitado

Teste	Número de Pontos	Número de Medianas	Capacidade Máxima por Grupo	Autor
1	50	5	120	Osman e Christofides (1994)
2	50	5	120	Osman e Christofides (1994)
3	50	5	120	Osman e Christofides (1994)
4	50	5	120	Osman e Christofides (1994)
5	50	5	120	Osman e Christofides (1994)
6	50	5	120	Osman e Christofides (1994)
7	50	5	120	Osman e Christofides (1994)
8	50	5	120	Osman e Christofides (1994)
9	50	5	120	Osman e Christofides (1994)
10	50	5	120	Osman e Christofides (1994)
11	100	10	120	Osman e Christofides (1994)
12	100	10	120	Osman e Christofides (1994)
13	100	10	120	Osman e Christofides (1994)
14	100	10	120	Osman e Christofides (1994)
15	100	10	120	Osman e Christofides (1994)
16	100	10	120	Osman e Christofides (1994)
17	100	10	120	Osman e Christofides (1994)
18	100	10	120	Osman e Christofides (1994)
19	100	10	120	Osman e Christofides (1994)
20	100	10	120	Osman e Christofides (1994)
SJC1	100	10	720	Lorena e Senne (2004)
SJC2	200	15	840	Lorena e Senne (2004)
SJC3a	300	25	740	Lorena e Senne (2004)
SJC3b	300	30	740	Lorena e Senne (2004)
SJC4a	402	30	840	Lorena e Senne (2004)
SJC4b	402	40	840	Lorena e Senne (2004)

Fonte: Osman e Christofides (1994) e Lorena e Senne (2004).

As instâncias de Lorena e Senne (2004) estão disponíveis em <http://www.lac.inpe.br/~lorena/instancias.html>. As instâncias propostas por Osman e

Christofides (1994) foram disponibilizadas pelos referidos autores na *OR-Library* (<http://people.brunel.ac.uk/~mastjb/jeb/orlib/pmedcapinfo.html>), criada por Beasley (1990).

A aplicação do algoritmo ao estudo de caso foi realizada para dois grupos distintos de dados. Primeiramente, foram realizados os agrupamentos para os clientes da situação atual da empresa e, em seguida, os agrupamentos para os novos clientes propostos. Os resultados foram comparados com aqueles obtidos pelo método exato com o objetivo de observar se os erros são aceitáveis e se o algoritmo é aplicável ao problema real.

4.3 ROTEIRIZAÇÃO

A roteirização, assim como o agrupamento capacitado, foi realizada tanto pelo método exato quanto pelo algoritmo *ILS* e os seus resultados comparados.

4.3.1 Método Exato

O método exato para resolução do problema do caixeiro viajante que foi utilizado neste trabalho, e que está apresentado a seguir, foi baseado na formulação proposta em Bodin *et al.* (1983).

$$(MIN) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad (j = 1, \dots, n) \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (9)$$

$$x_{ij} \in S; \quad x_{ij} \in \{0,1\} \quad (10)$$

$$S = \{(x_{ij}) | \sum_{i \in Q} \sum_{j \notin Q} \geq 1 \text{ para todo } Q \subseteq N\} \quad (11)$$

onde $N = \{1, \dots, n\}$ é o conjunto de pontos a serem visitados, incluindo a base; c_{ij} é o custo de utilizar o caminho do ponto i ao ponto j e x_{ij} é uma variável binária, sendo que, quando $x_{ij} = 1$, o arco do ponto i ao ponto j está incluído na rota; caso contrário, $x_{ij} = 0$. A equação (7) faz com que a distância total da rota seja minimizada. As equações (8) e (9) fazem com que para cada ponto a rota venha de

uma única cidade e vá a uma única cidade. As equações (10) e (11) fazem com que as variáveis sejam binárias e com que não existam sub-rotas.

Como na situação atual não existe método para definição das rotas, as quais são escolhidas pelos motoristas, não foi possível fazer uma comparação exata da diferença de qualidade que a nova roteirização, sozinha, pode gerar. A formulação foi aplicada aos agrupamentos atuais sugeridos pela empresa e, também, aos agrupamentos provenientes da utilização do algoritmo *ILS* para realização do agrupamento capacitado, considerando os novos clientes para atendimento propostos. A comparação dos resultados dessas duas aplicações apresentou as melhorias, em termos de distâncias percorridas, obtidas pelas técnicas anteriores, de filtragem e agrupamento.

4.3.2 Algoritmo ILS

O algoritmo *ILS* utilizado para o PCV neste trabalho foi baseado no trabalho de Stützle e Hoos (1999). A base do algoritmo é a mesma apresentada na Figura 3.3, no capítulo 3. Inicia-se buscando uma solução inicial, a qual passa pelo algoritmo de busca local. Entra-se, então, em um *loop* de perturbação, busca local e critério de aceitação, até que o critério de parada seja alcançado. Os quatro procedimentos do *ILS*, que foram aplicados ao problema do caixeiro viajante, serão descritos a seguir.

4.3.2.1 Solução Inicial

Para obtenção da solução inicial foi utilizado o algoritmo de inserção do mais próximo descrito a seguir. Este algoritmo diminui o tempo computacional necessário para a primeira busca local e gera uma solução inicial de boa qualidade.

- Passo 1: Escolha aleatoriamente um nó i ;
- Passo 2: Ache o nó k tal que c_{ik} (distância entre o nó i e o nó k) seja mínimo e forme a sub-rota $i - k - i$;
- Passo 3: Dada uma sub-rota, encontre o nó k que não esteja na sub-rota e que esteja mais próximo de qualquer nó da sub-rota;

- Passo 4: Encontre o arco (i, j) da sub-rota que minimize: $c_{ik} + c_{kj} - c_{ij}$ e insira k , ou seja, insira k imediatamente antes ou imediatamente após o ponto ao qual ele é mais próximo, o que gerar o menor custo;
- Volte ao passo 3 até obter um ciclo Hamiltoniano.

4.3.2.2 Busca Local

O procedimento de busca local utilizado foi a heurística de troca *3-opt*, descrita a seguir, a qual busca a melhoria da rota pela substituição de 3 arcos no roteiro estabelecido anteriormente e chega a um ótimo local.

- Retirar 3 arcos da rota produzindo caminhos desconectados;
- Reconectar estes 3 caminhos de modo que se tenha uma nova rota, usando arcos diferentes dos que foram removidos da rota original;
- Calcular o comprimento total da rota original e da nova rota formada, se o comprimento da nova rota for menor trocar a rota original pela nova rota formada;
- Continuar desconectando e reconectando até que nenhuma melhoria possa ser obtida.

4.3.2.3 Perturbação

O procedimento de perturbação utilizado foi o *double-bridge*, o qual não pode ser desfeito pela heurística *3-opt* utilizada na busca local, sendo, então, um algoritmo válido para utilização no *ILS*. Na aplicação do *double-bridge* corta-se a rota em quatro partes $S1-S2-S3-S4$ e recombina-se estes grupos na ordem $S4-S3-S2-S1$ para gerar a nova rota. O primeiro ponto de corte é escolhido aleatoriamente. Os pontos de corte seguintes são escolhidos entre os $\left\{\frac{n}{2,5}\right\}$ pontos mais próximos do primeiro ponto escolhido, onde n é o número total de pontos da rota.

4.3.2.4 Critério de Aceitação

A melhor resposta em termos de função objetivo foi aceita, ou seja, se a distância total da rota gerada após a perturbação e busca local foi menor que a distância total da rota anterior, a nova rota foi aceita.

4.3.2.5 Aplicação

O algoritmo *ILS* para o PCV foi aplicado aos agrupamentos atuais sugeridos pela empresa e, também, aos agrupamentos realizados considerando os novos clientes para atendimento propostos. Os resultados foram comparados com os obtidos utilizando-se o método exato, com o objetivo de determinar se o método é aplicável ao problema real. Não foram realizadas aplicações a problemas da literatura em função de o algoritmo já ter sido amplamente estudado para solucionar este tipo de problema.

4.4 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

O método atual utilizado pela empresa, como citado no capítulo 2, consiste em realizar a previsão de demanda, escolher os clientes a serem atendidos, agrupar os clientes pelo método das k -médias, realizar o ajuste dos atendimentos baseado na experiência do funcionário e realizar as entregas seguindo as rotas definidas por cada motorista.

O método proposto neste trabalho consiste em utilizar a previsão de demanda atual da empresa, utilizar um algoritmo para escolha dos clientes a serem atendidos, que considere as restrições e necessidades da empresa e dos clientes, realizar o agrupamento utilizando o algoritmo *ILS* para o método das p -medianas capacitado e realizar a roteirização dos veículos utilizando o algoritmo *ILS* para o problema do caixeiro viajante.

Além da comparação dos impactos gerados por cada item do método proposto, é necessária uma comparação geral entre a situação atual e a proposta. Não existe informação precisa sobre a quilometragem utilizada pela empresa para realizar os atendimentos atualmente. O algoritmo *ILS* para o PCV, aplicado a partir dos agrupamentos realizados pela empresa, foi utilizado como uma aproximação da distância percorrida no método atual.

A comparação desta aproximação das distâncias atuais com as distâncias percorridas no método proposto mostrou o impacto das etapas de filtragem de clientes e agrupamento. Estas distâncias puderam ser comparadas por se tratarem ambas de distâncias Euclidianas, e foram utilizadas para calcular a diferença de

eficiência entre os métodos, com o objetivo de se obter uma noção aproximada da melhoria geral. Foi utilizada para o cálculo a relação $\left(\frac{\text{quantidade de kg}}{km}\right)$.

Em termos de quantidade vendida, para o método proposto, foi considerado que a quantidade programada é uma boa aproximação para a quantidade vendida, já que não são marcados clientes que não podem ser atendidos ou clientes que ainda estejam com seus tanques cheios. Para a situação atual foi utilizada a quantidade efetivamente realizada de vendas pela empresa, que difere da quantidade programada conforme a tabela 2.4.

5 RESULTADOS

Serão expostos os resultados parciais para a filtragem dos clientes, agrupamento capacitado e roteirização, e também os resultados combinados de todos os métodos propostos.

5.1 FILTRAGEM DOS CLIENTES

A aplicação do método proposto foi feita para as programações do dia 5 ao dia 17 de dezembro de 2011, mesmas datas para as quais foram fornecidas as informações reais. Foram utilizadas as previsões de demanda fornecidas pela empresa, e foi considerado, para a programação de cada dia, que a empresa tivesse sido capaz de realizar a programação sugerida para o dia anterior, já que não acontecem marcações para datas erradas e as restrições de capacidade foram atendidas. A Tabela 5.1 sintetiza os resultados obtidos.

Tabela 5.1 – Detalhamento da programação de atendimentos proposta

DATA	CLIENTES ATENDIDOS	ATRASOS DE PROGRAMAÇÃO	ATRASO DEVIDO À DATA	MARCADO PARA DATA ERRADA	ATRASOS REALIZADOS	DEMANDA TOTAL (kg)
5/12	54	7	1	0	7	22.880
6/12	23	1	1	0	1	4.308
7/12	12	2	2	0	2	3.587
8/12	14	3	3	0	3	7.757
9/12	54	6	6	0	6	17.911
10/12	54	0	0	0	0	22.978
12/12	41	0	0	0	0	17.651
13/12	20	0	0	0	0	7.067
14/12	18	1	1	0	1	3.723
15/12	29	1	1	0	1	12.777
16/12	54	4	4	0	4	14.019
17/12	54	0	0	0	0	23.270
TOTAL	427	25	19	0	25	157.928

Fonte: A autora (2012).

Após a programação do primeiro dia, restaram ainda sete clientes em atraso. Isto ocorreu porque a quantidade de atrasos acumulados até a data em questão era muito grande e a capacidade de atendimento não foi suficiente para regularizar os atendimentos em um único dia. Todos os atrasos que aconteceram nos demais dias foram devido à data, ou seja, eram clientes que não poderiam ser atendidos no dia

da semana programado. Todos os atrasos realizados foram iguais aos atrasos de programação, já que não foram marcados clientes para datas erradas.

Durante a primeira semana ainda estava acontecendo um ajuste ao novo método. Durante a segunda semana, porém, era esperado que não houvesse mais atrasos, já que houve o cuidado de antecipar sempre a programação dos clientes que têm restrições de atendimento. Pode-se observar, porém, que nos dias 14, 15 e 16 ocorreram atrasos devido à data. Os clientes que formaram esse atraso foram atendidos no sábado anterior, dia 10, e só poderiam ser atendidos novamente no sábado dia 17. O fato de estes clientes precisarem de atendimento em menos de uma semana, apesar de suas restrições de estacionamento, mostra a necessidade de que o tamanho de seus tanques instalados seja revisto.

Em alguns dias não foi necessário utilizar a capacidade máxima de atendimento, nem em número de clientes e nem em quantidade fornecida, pois todos os demais clientes da empresa com data de entrega prevista para a semana seguinte ainda não haviam utilizado o mínimo estipulado de 60% da capacidade de seus tanques, não tendo assim o reabastecimento adiantado.

A demanda por gás utilizou, em média, apenas 48,74% da capacidade dos caminhões. A verdadeira restrição de atendimento está no número de clientes, o qual é limitado pelo horário de trabalho das equipes de entrega, sendo que a capacidade máxima é utilizada apenas em alguns dias da semana. Caso a empresa decida expandir seus negócios na região do Paraná pode ser considerada a alternativa de, ao invés de comprar mais caminhões, colocar duas equipes de trabalho em cada caminhão.

Cada equipe trabalharia 6 horas por dia, e a troca de trabalhadores seria realizada em um lugar e horário estipulado na região de entrega, para que não houvesse o retorno do caminhão à cidade de Balsa Nova, uma vez que este não seria necessário já que existe ociosidade de capacidade. Esta solução diminuiria o custo por quilômetro de entrega da empresa, pois aumentaria a capacidade de atendimento sem aumentar os custos na mesma proporção, já que não seria necessário investimento em aquisição de novos veículos e manutenção dos mesmos, além de diminuir a distância média percorrida em função de cada caminhão atender mais clientes por dia em uma mesma região.

Outra forma de melhorar a utilização da capacidade atual seria investir em contratos com clientes que podem ser atendidos nos dias da semana de menor

movimento (terças, quartas e quintas), em locais que não apresentem restrições de estacionamento.

Foi realizada uma comparação entre a situação real de programação da empresa e os resultados do método proposto, conforme apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Comparação entre os métodos atual e proposto para escolha de clientes

	ATRASOS DE PROGRAMAÇÃO	ATRASSO DEVIDO À DATA	MARCADO PARA DATA ERRADA	ATRASOS REALIZADOS	DEMANDA MÉDIA POR CLIENTES (kg)
Atual	43	14	55	98	307,81
Proposto	25	19	0	25	369,85
Diferença	-41,86%	35,71%	-100,00%	-74,49%	20,16%

Fonte: A autora (2012).

Os atrasos de programação foram reduzidos em 41,86%. Os atrasos devido à data aumentaram 35,71%. Isto ocorreu em função do programa atual permitir a programação de clientes que não podem ser atendidos, o que reduz o atraso devido à data, porém aumenta os atrasos reais. Não foram realizadas mais programações para a data errada. Os atrasos realizados, ou quantidade total de falhas, tiveram redução de 74,49%. A demanda média por cliente em quantidade de produto aumentou 20,16%, o que indica melhoria na economia de escala.

Durante a primeira semana de testes ocorreu a adaptação ao novo método e os atendimentos estavam sendo regularizados. Ao utilizar apenas os dados referentes à segunda semana de programações para comparar o método atual com o proposto, observa-se que a redução de falhas foi ainda maior, como mostra a Tabela 5.3 a seguir.

Tabela 5.3 – Comparação entre os métodos atual e proposto após adaptação

	ATRASOS DE PROGRAMAÇÃO	ATRASSO DEVIDO À DATA	MARCADO PARA DATA ERRADA	ATRASOS REALIZADOS	DEMANDA MÉDIA POR CLIENTES (kg)
Atual	32	12	34	66	343,47
Proposto	6	6	0	6	363,46
Diferença	-81,25%	-50,00%	-100,00%	-90,91%	5,82%

Fonte: A autora (2012).

Os atrasos de programação foram reduzidos em 81,25%. Os atrasos devido à data reduziram 50%. As marcações para datas erradas foram eliminadas. Os atrasos

realizados tiveram redução de 90,91%, e este valor só não chegou a 100% em função da incompatibilidade dos tamanhos dos tanques dos clientes, como mencionado anteriormente.

5.2 AGRUPAMENTO DOS PONTOS DE DEMANDA

A divisão dos clientes a serem atendidos pelo número de caminhões disponíveis foi tratada como um problema de agrupamento capacitado. Foi utilizado o método exato e implementado um algoritmo *ILS* para este tipo de problema, conforme descrito no capítulo 4. O algoritmo *ILS* foi testado também para instâncias da literatura.

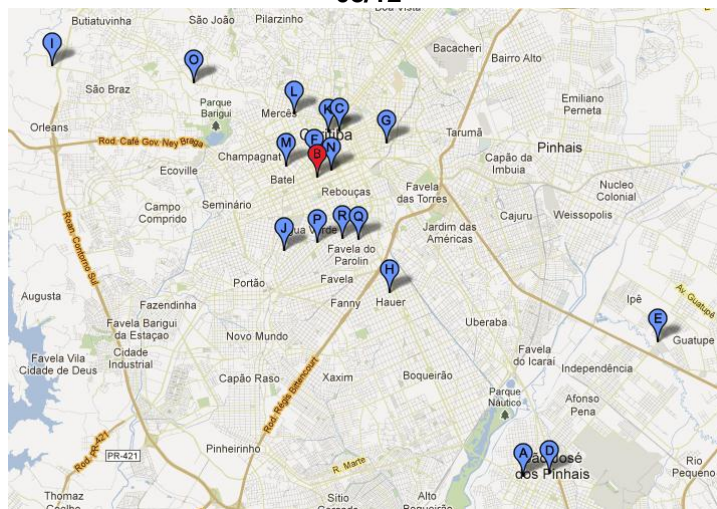
5.2.1 Método Exato

O método exato foi utilizado para obter as distâncias dos pontos às suas medianas (sem alterar o agrupamento sugerido) para a situação atual da empresa, para obter o melhor agrupamento possível para os clientes sugeridos pela empresa, e para obter o melhor agrupamento possível para os clientes propostos.

Os resultados foram obtidos utilizando o software LINGO (*Optimization Modeling Software for Linear, Nonlinear, and Integer Programming*), com a formulação exata para o problema das p -medianas capacitado apresentada no capítulo 4. Os tempos computacionais foram baixos. A maior parte dos problemas rodou em menos de 3 segundos, e o maior tempo necessário foi 86 segundos.

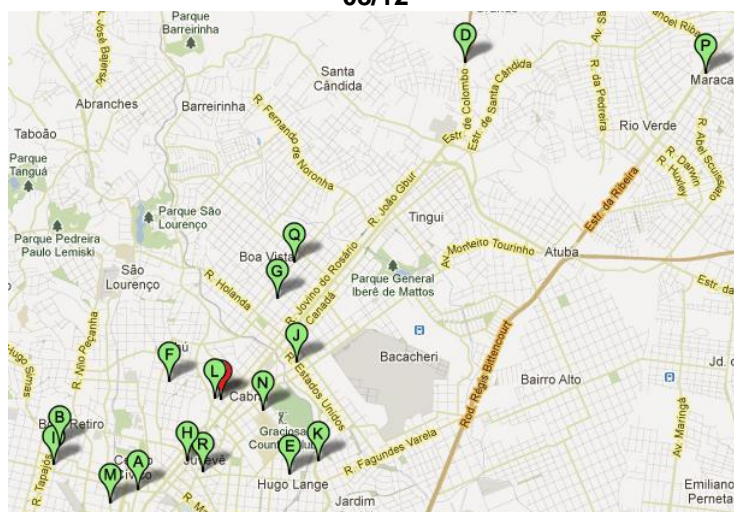
As figuras 5.1, 5.2 e 5.3, que seguem, exemplificam o agrupamento realizado pelo método exato. Foram considerados os clientes definidos pela empresa para o dia 08/12, e agrupados pelo método exato. Cada figura representa um dos grupos formados, com o ponto considerado sua mediana em vermelho. Vale lembrar que a função objetivo do método exato procura diminuir a distância total somada de todos os pontos às suas respectivas medianas.

Figura 5.1 – Grupo 1 e sua mediana, clientes atuais agrupados pelo método exato para o dia 08/12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura 5.2 – Grupo 2 e sua mediana, clientes atuais agrupados pelo método exato para o dia 08/12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura 5.3 – Grupo 3 e sua mediana, clientes atuais agrupados pelo método exato para o dia 08/12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

A tabela 5.4 a seguir mostra, para os clientes escolhidos pela empresa, a distância total de todos os pontos às suas medianas. A coluna “Atual” mostra a distância total, para cada dia, realizada pelos agrupamentos atuais da própria empresa. A coluna “Método Exato” mostra a distância total para os grupos formados utilizando a formulação matemática, além da comparação entre essas duas situações.

Tabela 5.4 – Resultado da formulação exata para o agrupamento capacitado dos clientes propostos pela empresa

Data	Atual	Método Exato	
	Distância Total (m)	Distância Total (m)	Diferença em relação à situação atual
05/dez	509.349	448.831	-11,88%
06/dez	411.531	387.705	-5,79%
07/dez	372.862	314.752	-15,58%
08/dez	459.950	366.783	-20,26%
09/dez	460.594	420.876	-8,62%
10/dez	300.922	278.465	-7,46%
12/dez	343.868	307.363	-10,62%
13/dez	422.509	357.307	-15,43%
14/dez	465.925	425.886	-8,59%
15/dez	429.264	368.839	-14,08%
16/dez	410.707	396.722	-3,41%
17/dez	319.862	287.911	-9,99%
Total	4.907.343	4.361.440	-11,12%

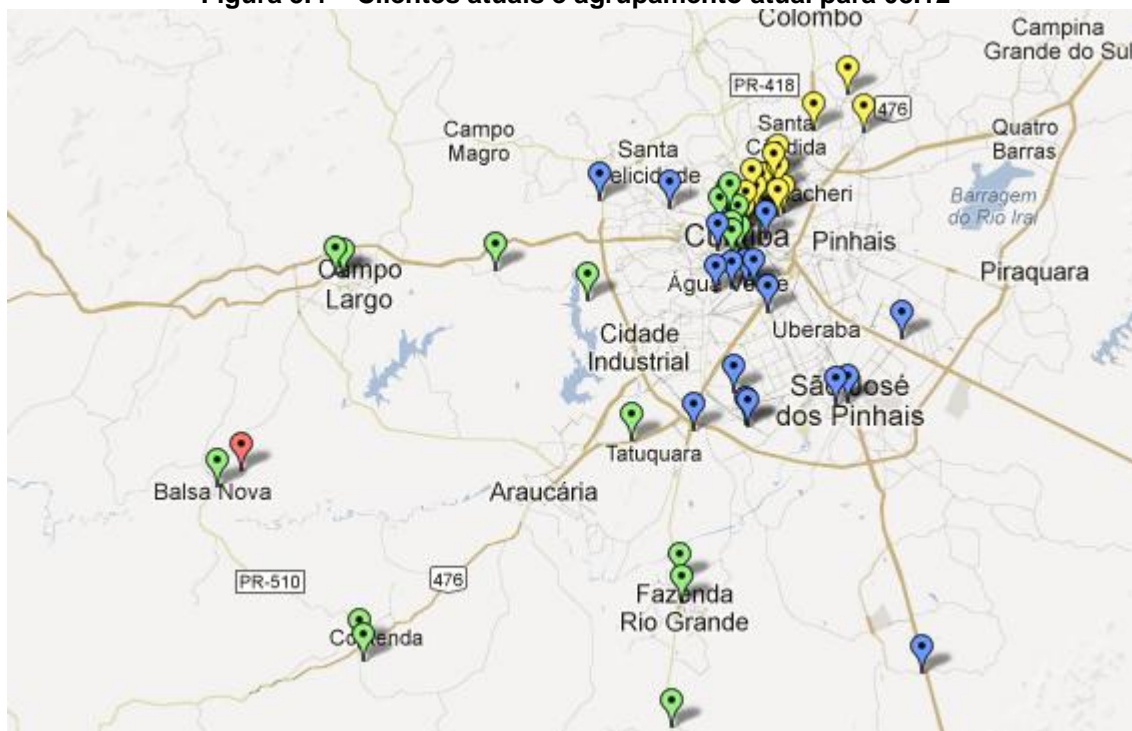
Fonte: A autora (2012).

O método exato apresentou uma redução das distâncias, quando comparado aos agrupamentos realizados atualmente pela empresa. Houve uma melhoria total de 11,12% nas distâncias totais dos pontos às suas medianas, apenas com a modificação do método de agrupamento.

Além da redução das distâncias, outra grande vantagem, em relação à utilização da formulação do problema das p -medianas capacitado, é o respeito às capacidades dos caminhões, tanto em termos de quantidade de produtos quanto quantidade de clientes a serem atendidos diariamente.

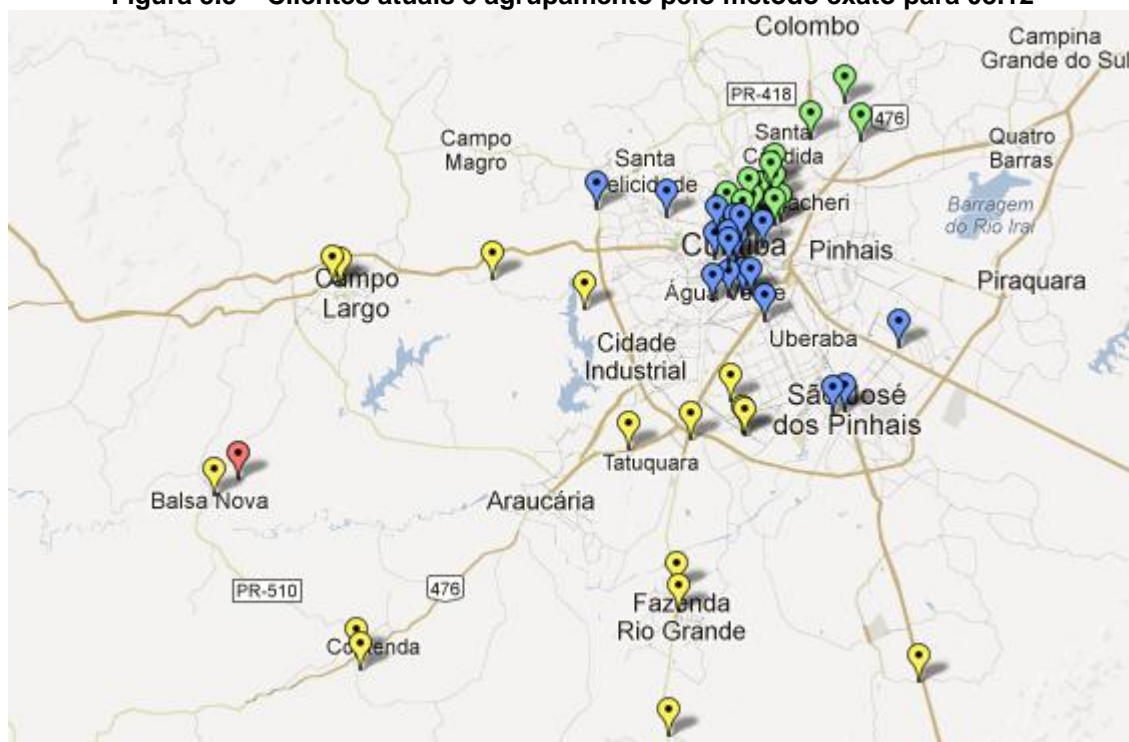
As Figuras 5.4 e 5.5, a seguir, mostram os agrupamentos realizados pela empresa e pelo método exato, respectivamente, para os mesmos clientes, para o dia 08/12/2011. É possível verificar visualmente que os agrupamentos obtidos pelo método exato estão mais bem divididos que aqueles obtidos pelo método atual. Os demais agrupamentos podem ser encontrados no Apêndice A.

Figura 5.4 – Clientes atuais e agrupamento atual para 08.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura 5.5 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 08.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Na tabela 5.5 a seguir, em “Novo”, estão os dados para os grupos formados com o método exato, porém considerando os clientes propostos após a filtragem, ou seja, a comparação com a situação atual combina a diferença gerada pela nova

proposta de atendimento com o método exato para o problema de agrupamento. A redução total das distâncias dos pontos às suas medianas, neste caso, foi de 31,83%. Esta redução é maior em função da diminuição da quantidade total de clientes atendidos, a qual, por sua vez, sofreu uma redução de 29,8%. O aumento na quantidade vendida foi de 29,4%, quando comparada a quantidade efetivamente entregue pela empresa na situação atual com a quantidade prevista para a nova proposta.

Tabela 5.5 – Comparação entre a situação atual e proposta utilizando agrupamento pelo método exato

Data	Clientes			Distância dos pontos às medianas (m)			Quantidade (kg)		
	Atual	Novo	Dif. %	Atual	Novo	Dif. %	Atual	Novo	Dif. %
05/dez	53	54	1,9%	509.349	453.783	-10,9%	6.523	22.880	250,8%
06/dez	54	23	-57,4%	411.531	187.353	-54,5%	13.310	4.308	-67,6%
07/dez	45	12	-73,3%	372.862	135.857	-63,6%	9.129	3.587	-60,7%
08/dez	52	14	-73,1%	459.950	192.427	-58,2%	11.306	7.757	-31,4%
09/dez	54	54	0,0%	460.594	498.874	8,3%	6.959	17.911	157,4%
10/dez	51	54	5,9%	300.922	274.374	-8,8%	6.711	22.978	242,4%
12/dez	49	41	-16,3%	343.868	306.323	-10,9%	12.205	17.651	44,6%
13/dez	54	20	-63,0%	422.509	141.932	-66,4%	9.947	7.067	-29,0%
14/dez	49	18	-63,3%	465.925	192.276	-58,7%	10.838	3.723	-65,6%
15/dez	48	29	-39,6%	429.264	218.359	-49,1%	11.264	12.777	13,4%
16/dez	51	54	5,9%	410.707	462.956	12,7%	14.271	14.019	-1,8%
17/dez	48	54	12,5%	319.862	280.587	-12,3%	9.611	23.270	142,1%
Total	608	427	-29,8%	4.907.343	3.345.101	-31,8%	122.074	157.928	29,4%

Fonte: A autora (2012).

A utilização do método exato com baixo tempo computacional somente foi possível por se tratar de problemas com poucos pontos, considerando o atendimento máximo de 54 clientes por dia. O tempo computacional, porém, cresce exponencialmente conforme aumenta o número de pontos a serem agrupados, fazendo com que a aplicação da meta-heurística *ILS* torne-se necessária em função de uma possível expansão da empresa ou da necessidade de adaptação do método proposto a outros problemas reais de maior porte.

O custo dos *softwares* capazes de chegar à resolução exata é alto, principalmente quando consideradas empresas de pequeno e médio porte. Não haver recursos para investimento neste tipo de tecnologia é mais um motivo para utilização maior de meta-heurísticas, as quais podem ser implementadas de forma mais simples e adaptadas para a realidade de cada empresa.

5.2.2 Algoritmo ILS

O algoritmo ILS para o agrupamento capacitado, proposto no capítulo 4, foi implementado em Visual Studio 2012, .NET Framework 4. Assim como para o método exato, foi realizado o agrupamento para os clientes atuais definidos pela empresa e também para os clientes propostos neste trabalho.

A tabela 5.6 a seguir demonstra, para cada dia de entregas, a distância total dos pontos às suas medianas, primeiramente para os clientes definidos pela empresa e posteriormente para os clientes propostos após a filtragem.

Tabela 5.6 – Comparação dos resultados dos agrupamentos realizados pelo método exato e algoritmo ILS

Distância total dos pontos às medianas (m)			
Data	Agrupamento Método Exato	Agrupamento ILS	Diferença entre Exato e ILS
Clientes Atuais			
5/12	448.831	449.854	0,23%
6/12	387.705	387.705	0,00%
7/12	314.752	314.752	0,00%
8/12	366.783	366.955	0,05%
9/12	420.876	420.971	0,02%
10/12	278.465	279.097	0,23%
12/12	307.363	307.363	0,00%
13/12	357.307	357.307	0,00%
14/12	425.886	436.102	2,40%
15/12	368.839	368.839	0,00%
16/12	396.722	396.722	0,00%
17/12	287.911	287.911	0,00%
Clientes Propostos			
5/12	453.783	453.783	0,00%
6/12	187.353	187.353	0,00%
7/12	135.857	135.857	0,00%
8/12	192.427	192.427	0,00%
9/12	498.874	499.306	0,09%
10/12	274.374	274.934	0,20%
12/12	306.323	306.323	0,00%
13/12	141.932	141.932	0,00%
14/12	192.276	192.276	0,00%
15/12	218.359	218.359	0,00%
16/12	462.956	462.956	0,00%
17/12	280.587	281.787	0,43%

Fonte: A autora (2013).

A primeira coluna especifica a data. A segunda coluna contém a distância total para o agrupamento realizado pelo método exato. A terceira coluna apresenta a distância total para o agrupamento realizado pela meta-heurística *ILS*. A quarta coluna apresenta a diferença entre os resultados do método exato e do *ILS*, ou seja, o erro percentual da meta-heurística proposta.

Foram realizados, no total, 24 agrupamentos utilizando o algoritmo proposto, dos quais 66,7% chegaram à mesma solução do método exato, 29,2% chegaram a uma distância total dos pontos às medianas menos de 1% maior que o resultado do método exato, e 4,2% apresentaram erro inferior a 3%. Nenhum problema resultou em erro superior a 3%.

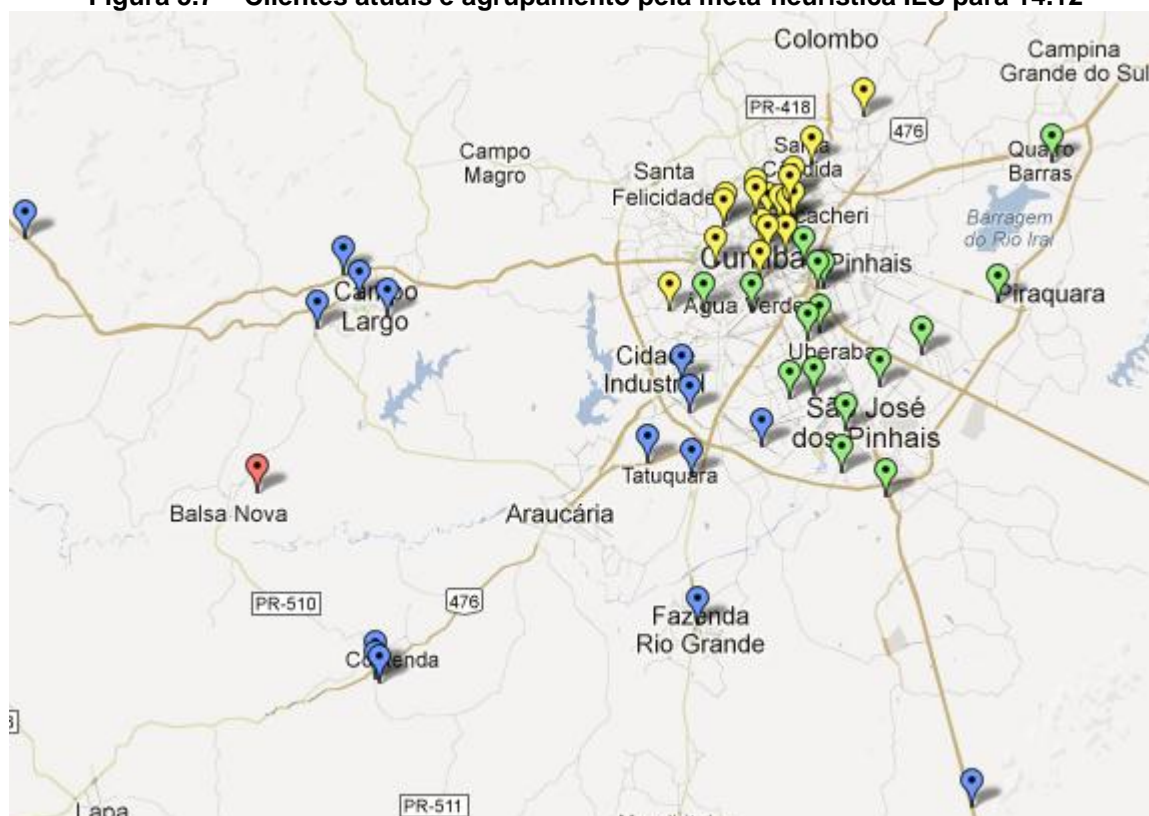
As figuras 5.6 e 5.7 representam, para os clientes escolhidos pela empresa, o agrupamento realizado pelo método exato e o agrupamento realizado pela *ILS*. Este foi o agrupamento *ILS* com maior erro em relação à resposta ótima, com uma diferença de 2,4% na distância total dos pontos às suas medianas.

Figura 5.6 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 14.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura 5.7 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 14.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

A tabela 5.7 apresenta as distâncias, dos pontos às suas medianas, para a situação atual da empresa, e para a os clientes propostos e agrupados utilizando o *ILS*, além da diferença entre eles.

Tabela 5.7 – Comparação entre a situação atual e proposta utilizando agrupamento ILS
Distância dos pontos às medianas (m)

Data	Atual	Novo	Dif. %
05/dez	509.349	453.783	-10,9%
06/dez	411.531	187.353	-54,5%
07/dez	372.862	135.857	-63,6%
08/dez	459.950	192.427	-58,2%
09/dez	460.594	499.306	8,4%
10/dez	300.922	274.934	-8,6%
12/dez	343.868	306.323	-10,9%
13/dez	422.509	141.932	-66,4%
14/dez	465.925	192.276	-58,7%
15/dez	429.264	218.359	-49,1%
16/dez	410.707	462.956	12,7%
17/dez	319.862	281.787	-11,9%
Total	4.907.343	3.347.293	-31,8%

Fonte: A autora (2013).

Fazendo uma comparação entre a tabela 5.7 e a tabela 5.5, a qual compara a situação atual com a proposta utilizando o método exato para realizar o agrupamento, pode-se destacar que a diferença de distância para ambos os casos foi uma redução de 31,8%. Os erros apresentados pelo algoritmo *ILS*, quando comparado ao método exato, nos problemas individuais, não tiveram, então, impacto significativo nas distâncias totais a serem percorridas.

5.2.3 Algoritmo *ILS* Aplicado a Instâncias da Literatura

O algoritmo *ILS* para o agrupamento capacitado foi também aplicado às instâncias da literatura descritas no capítulo 4. Os problemas variaram de 50 pontos com 5 medianas até 402 pontos com 40 medianas.

Existe uma diferença entre os dados do estudo de caso e aqueles comumente testados na literatura. No estudo de caso, os agrupamentos apresentavam restrições tanto em relação à quantidade total demandada pelos pontos a serem atendidos, quanto em relação à quantidade de pontos máxima de cada agrupamento. Os problemas da literatura apresentam restrição apenas quanto à quantidade demandada, sem limitar a quantidade de pontos que podem ser alocados a uma mesma mediana. Para utilização do mesmo algoritmo programado foi considerado, então, que o número máximo de clientes em um único agrupamento era igual ao número total de clientes a serem distribuídos.

A tabela 5.8 apresenta as características de cada problema (número de pontos, número de medianas, e capacidade de cada grupo), o melhor resultado encontrado na literatura em termos de distância total dos pontos às suas medianas, o resultado obtido com o agrupamento *ILS* proposto, e o erro deste em relação ao melhor resultado conhecido.

Observando apenas as instâncias propostas por Osman e Christofides (1994), problemas 1 ao 20, pode-se observar que, para problemas com características próximas, ou seja, mesmo padrão de capacidade e demanda, o erro tende a aumentar conforme aumentam o número de pontos e medianas. Para os problemas 1 a 10, com 50 pontos e 5 medianas, o erro médio foi de 2,36%, enquanto para os problemas 11 a 20, com 100 pontos e 10 medianas, o erro médio foi de 3,74%.

Os problemas apresentados por Lorena e Senne (2004), sjc1 a sjc4b, apesar de utilizarem mais pontos e mais medianas do que os problemas apresentados por

Osman e Christofides (1994), tiveram erro médio de 2,07%. A qualidade do algoritmo proposto depende, então, não apenas da quantidade de pontos e medianas, mas também da “folga” existente entre as demandas dos pontos e a capacidade de cada agrupamento.

Tabela 5.8 – Resultados do agrupamento ILS para as instâncias da literatura

Problema	Número de Pontos	Número de Medianas	Capacidade Máxima por Grupo	Resultado literatura	Resultado Obtido	Erro Distância
1	50	5	120	713	728	2,10%
2	50	5	120	740	758	2,43%
3	50	5	120	751	767	2,13%
4	50	5	120	651	668	2,61%
5	50	5	120	664	679	2,26%
6	50	5	120	778	796	2,31%
7	50	5	120	787	807	2,54%
8	50	5	120	820	838	2,20%
9	50	5	120	715	732	2,38%
10	50	5	120	829	851	2,65%
11	100	10	120	1.006	1.053	4,67%
12	100	10	120	966	997	3,21%
13	100	10	120	1.026	1.053	2,63%
14	100	10	120	982	1.016	3,46%
15	100	10	120	1.091	1.134	3,94%
16	100	10	120	954	990	3,77%
17	100	10	120	1.034	1.082	4,64%
18	100	10	120	1.043	1.080	3,55%
19	100	10	120	1.031	1.065	3,30%
20	100	10	120	1.005	1.047	4,18%
sjc1	100	10	720	17.288,99	17.426,4	0,79%
sjc2	200	15	840	33.270,94	33.577,61	0,92%
sjc3a	300	25	740	45.335,16	46.564,16	2,71%
sjc3b	300	30	740	40.635,9	41.622,57	2,43%
sjc4a	402	30	840	61.925,51	63.548,61	2,62%
sjc4b	402	40	840	52.458	53.987,46	2,92%

Fonte: A autora (2013).

A tabela 5.9 a seguir apresenta, para as instâncias propostas por Lorena e Senne (2004), o tempo computacional utilizado para chegar ao resultado encontrado. A meta-heurística *ILS*, proposta para o agrupamento capacitado, necessitou de tempo computacional inferior a 2 segundos para todos os problemas testados.

Tabela 5.9 – Tempo computacional para agrupamento das instâncias da literatura

Problema	Número de Pontos	Número de Medianas	Capacidade Máxima por Grupo	Tempo Obtido (s)
sjc1	100	10	720	0,12
sjc2	200	15	840	0,35
sjc3a	300	25	740	0,89
sjc3b	300	30	740	0,75
sjc4a	402	30	840	1,45
sjc4b	402	40	840	1,60

Fonte: A autora (2013).

5.3 ROTEIRIZAÇÃO

A roteirização de cada agrupamento foi tratada como um problema do caixeiro viajante. Cada rota parte da base da empresa, passa por todos os pontos do agrupamento, e retorna à base da empresa. Foi utilizado o método exato, e implementado o algoritmo *ILS* para o PCV, conforme descrito no capítulo 4.

Na situação atual da empresa não é realizada a roteirização, assim como não foram disponibilizados os dados referentes à quilometragem percorrida por dia para cada caminhão. Portanto não é possível saber a diferença entre a distância percorrida e a proposta, comparando a eficiência do método proposto isoladamente.

Foi realizada a comparação entre o algoritmo *ILS* para o PCV e o método exato, conforme demonstra a tabela 5.10. Dos 63 problemas testados com a meta-heurística *ILS*, 87,3% chegaram ao mesmo resultado do método exato, e os 12,7% restantes tiveram erro inferior a 2%.

Tabela 5.10 – Comparação do PCV pelos métodos exato e ILS

Data	Grupo	Nº de Clientes	Rota (km) Mét. Exato	Rota (km) <i>ILS</i> PCV	Diferença entre os Métodos
Clientes definidos pela empresa agrupados pelo ILS.					
05/dez	1	18	162,023	162,023	0,00%
05/dez	2	18	111,571	111,571	0,00%
05/dez	3	17	140,258	140,258	0,00%
06/dez	1	18	110,281	110,281	0,00%
06/dez	2	18	138,260	138,260	0,00%
06/dez	3	18	120,966	120,966	0,00%
07/dez	1	18	108,393	108,427	0,03%

07/dez	2	17	150,502	152,270	1,17%
07/dez	3	10	115,104	115,104	0,00%
08/dez	1	17	147,674	147,674	0,00%
08/dez	2	18	122,763	122,763	0,00%
08/dez	3	17	103,833	103,833	0,00%
09/dez	1	18	124,830	124,830	0,00%
09/dez	2	18	118,179	118,179	0,00%
09/dez	3	18	124,440	124,440	0,00%
10/dez	1	17	129,950	131,400	1,12%
10/dez	2	17	101,887	101,887	0,00%
10/dez	3	17	102,775	102,775	0,00%
12/dez	1	17	102,985	102,985	0,00%
12/dez	2	18	154,191	154,191	0,00%
12/dez	3	14	110,717	110,717	0,00%
13/dez	1	18	119,492	119,492	0,00%
13/dez	2	18	105,539	105,539	0,00%
13/dez	3	18	151,096	151,096	0,00%
14/dez	1	17	131,999	131,999	0,00%
14/dez	2	16	160,098	160,098	0,00%
14/dez	3	16	141,039	141,039	0,00%
15/dez	1	18	141,714	141,714	0,00%
15/dez	2	17	104,695	104,695	0,00%
15/dez	3	13	156,514	156,514	0,00%
16/dez	1	18	142,743	143,732	0,69%
16/dez	2	18	111,988	111,988	0,00%
16/dez	3	15	153,665	153,665	0,00%
17/dez	1	18	132,228	132,228	0,00%
17/dez	2	18	111,740	111,740	0,00%
17/dez	3	12	148,176	148,176	0,00%

Cientes propostos e agrupados pelo ILS

05/dez	1	18	126,479	126,479	0,00%
05/dez	2	18	114,177	114,177	0,00%
05/dez	3	18	140,729	140,729	0,00%
06/dez	1	7	141,620	141,620	0,00%
06/dez	2	16	107,698	107,891	0,18%
07/dez	1	12	147,881	147,881	0,00%
08/dez	1	14	176,359	176,359	0,00%
09/dez	1	18	137,481	137,481	0,00%
09/dez	2	18	138,593	138,593	0,00%
09/dez	3	18	152,532	152,532	0,00%
10/dez	1	18	107,658	107,658	0,00%
10/dez	2	18	149,158	149,158	0,00%
10/dez	3	18	82,458	82,458	0,00%
12/dez	1	7	138,395	138,395	0,00%
12/dez	2	17	149,845	150,174	0,22%
12/dez	3	17	109,857	109,857	0,00%

13/dez	1	16	132,000	134,476	1,88%
13/dez	2	4	61,690	61,690	0,00%
14/dez	1	18	141,207	141,207	0,00%
15/dez	1	12	109,933	109,933	0,00%
15/dez	2	17	133,538	133,654	0,09%
16/dez	1	18	134,963	134,963	0,00%
16/dez	2	18	126,795	126,795	0,00%
16/dez	3	18	114,529	114,529	0,00%
17/dez	1	18	112,736	112,736	0,00%
17/dez	2	18	182,223	182,223	0,00%
17/dez	3	18	100,985	100,985	0,00%

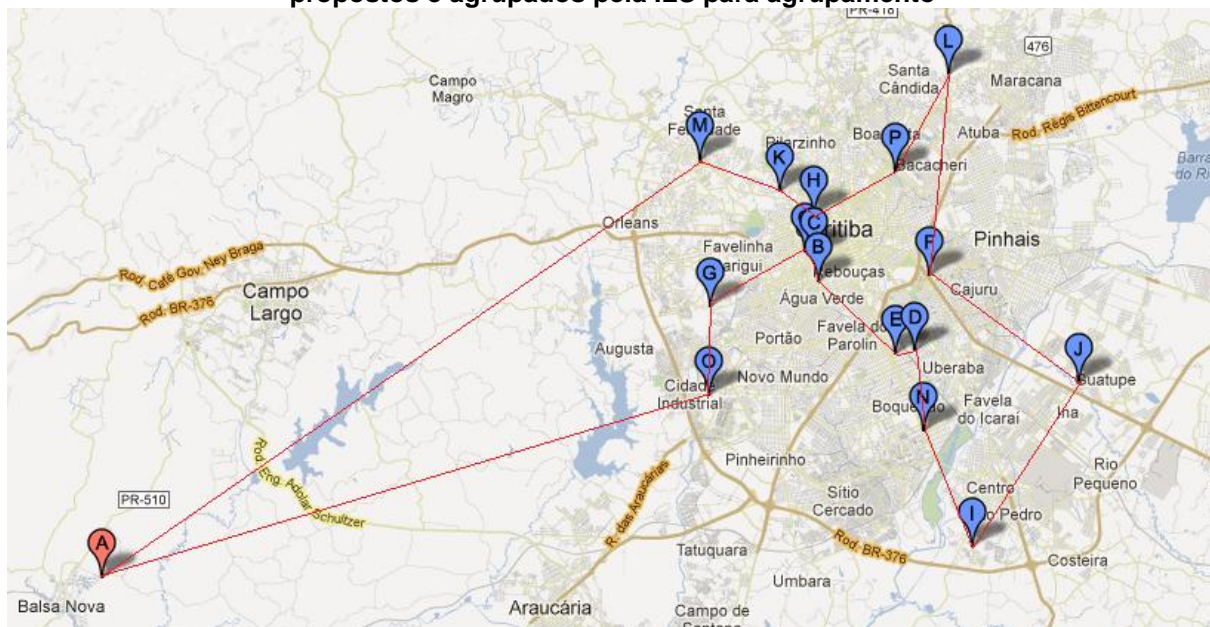
Fonte: A autora (2013).

As figuras 5.8 e 5.9, a seguir, apresentam as rotas definidas, pelo método exato e pela meta-heurística *ILS* para o PCV, respectivamente. As figuras consideram o grupo 1 do agrupamento realizado com a meta-heurística *ILS* para o agrupamento capacitado, do dia 13/12, para os clientes propostos neste trabalho. Este grupo foi o que apresentou maior erro da *ILS* para o PCV em relação à solução exata.

Ao definir as rotas sugeridas de cada caminhão é possível observar o impacto que a distância da base da empresa tem em relação à localização dos clientes. A tabela 5.11 apresenta a distância total da rota, proposta pelo agrupamento *ILS*, e a distância da base (soma entre a distância da base ao primeiro ponto de entrega, e a distância do último ponto a ser abastecido até a base), além do quanto esta distância da base representa percentualmente em relação à distância total da rota proposta.

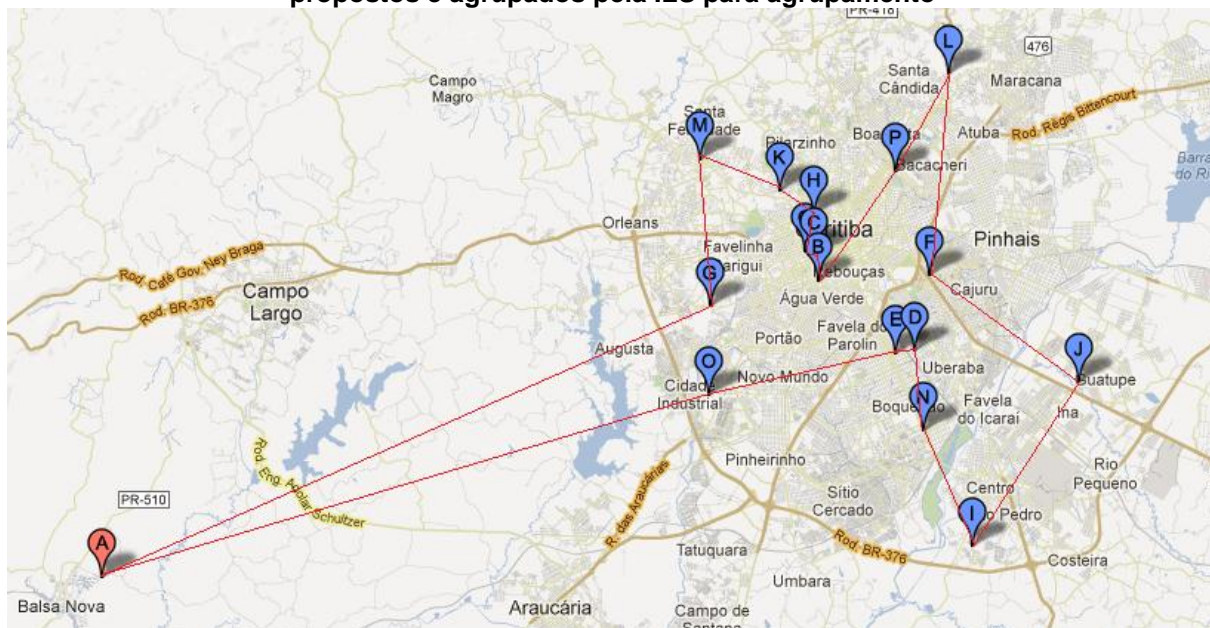
A distância percorrida entre a base e o primeiro cliente e entre o último cliente e a base chega a representar 76% da quilometragem total da rota proposta. Em média, a distância da base representa 44,5% das rotas para os agrupamentos realizados pela empresa (com os clientes definidos pela empresa), e 43,1% das rotas para os agrupamentos realizados pela meta-heurística *ILS* para o agrupamento capacitado (com os clientes propostos).

Figura 5.8 – rota definida pelo método exato para o grupo 1 de 13/12, considerando clientes propostos e agrupados pela ILS para agrupamento



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura 5.9 – rota definida pela ILS para o PCV para o grupo 1 de 13/12, considerando clientes propostos e agrupados pela ILS para agrupamento



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Tabela 5.11 – Impacto da localização da empresa na distância percorrida

Data	Grupo	Clientes e Agrupamentos atuais da empresa			Clientes propostos agrupados pelo ILS		
		Rota (km) ILS PCV	Distância da base (km)	Impacto da Localização da Base	Rota (km) ILS PCV	Distância da base (km)	Impacto da Localização da Base
05/dez	1	162,023	79,188	49%	126,479	75,142	59%
05/dez	2	111,571	66,718	60%	114,177	67,769	59%
05/dez	3	140,258	26,842	19%	140,729	26,842	19%
06/dez	1	110,281	70,101	64%	141,620	80,189	57%
06/dez	2	138,260	26,842	19%	107,891	31,445	29%
06/dez	3	120,966	64,548	53%	x	x	x
07/dez	1	108,427	77,219	71%	147,881	42,080	28%
07/dez	2	152,270	70,079	46%	x	x	x
07/dez	3	115,104	17,196	15%	x	x	x
08/dez	1	147,674	62,126	42%	176,359	46,661	26%
08/dez	2	122,763	16,986	14%	x	x	x
08/dez	3	103,833	78,206	75%	x	x	x
09/dez	1	124,830	84,302	68%	137,481	70,607	51%
09/dez	2	118,179	16,986	14%	138,593	13,020	9%
09/dez	3	124,440	68,637	55%	152,532	79,337	52%
10/dez	1	131,400	58,507	45%	107,658	74,975	70%
10/dez	2	101,887	29,812	29%	149,158	30,604	21%
10/dez	3	102,775	75,492	73%	82,458	62,894	76%
12/dez	1	102,985	73,476	71%	138,395	93,570	68%
12/dez	2	154,191	89,277	58%	150,174	73,529	49%
12/dez	3	110,717	29,812	27%	109,857	27,602	25%
13/dez	1	119,492	63,281	53%	134,476	60,525	45%
13/dez	2	105,539	26,667	25%	61,690	31,784	52%
13/dez	3	151,096	67,225	44%	x	x	x
14/dez	1	131,999	77,939	59%	141,207	30,604	22%
14/dez	2	160,098	61,605	38%	x	x	x
14/dez	3	141,039	26,667	19%	x	x	x
15/dez	1	141,714	78,753	56%	109,933	38,920	35%
15/dez	2	104,695	29,812	28%	133,654	69,680	52%
15/dez	3	156,514	57,996	37%	x	x	x
16/dez	1	143,732	83,809	58%	134,963	64,007	47%
16/dez	2	111,988	74,536	67%	126,795	81,502	64%
16/dez	3	153,665	29,602	19%	114,529	14,994	13%
17/dez	1	132,228	77,124	58%	112,736	76,653	68%
17/dez	2	111,740	67,257	60%	182,223	87,576	48%
17/dez	3	148,176	48,439	33%	100,985	46,582	46%
Total		4.618,549	2.053,064	44,5%	3.474,633	1.499,093	43,1%

Fonte: A autora (2013).

O grande impacto da localização da empresa na distância percorrida demonstra a necessidade de realização de um estudo sobre a viabilidade de mudança da localização. As dificuldades em tornar uma nova localização viável são o custo envolvido das novas instalações e da mudança, mas principalmente as restrições governamentais, relacionadas a segurança e meio ambiente, que impedem instalações de armazenamento de gás em áreas populosas.

Também é possível extrair da tabela 5.11 a diferença de distância entre o método atual utilizado pela empresa e o proposto neste trabalho. Para as duas situações foi utilizada a meta-heurística *ILS* para o PCV, já que não estão disponíveis os registros reais da empresa. A comparação demonstra, então, a diferença das duas propostas anteriores em conjunto, ou seja, a diferença gerada pela filtragem dos clientes e agrupamento *ILS*, quando comparada a situação atual da empresa.

Na situação atual, se fosse feita a roteirização pelo *ILS* para o PCV, seriam acumulados ao final das duas semanas 4.618,549km, enquanto para os clientes propostos agrupados pelo *ILS* para o agrupamento capacitado, a distância acumulada seria de 3.474,633km, uma redução de 24,8%.

A comparação das distâncias dos pontos às medianas, nos agrupamentos, chegou a uma redução de 31,8%, como consta no item 5.2.2. Ao fazer a roteirização, a diferença entre a situação atual e proposta tornou-se menor em função do impacto da distância da empresa aos clientes. Em outras palavras, os pontos dos grupos ficaram mais próximos, porém a distância total percorrida não diminuiu na mesma proporção em função da distância da base aos grupos.

5.4 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

Foi realizada a comparação entre a situação atual da empresa e a combinação dos algoritmos propostos neste trabalho. A comparação realizada consistiu na quantidade de produto vendida dividida pela distância percorrida para realizar as vendas, assim como definido no capítulo 4. O cálculo foi realizado para cada dia de programação, para as duas situações.

Para a situação atual foram considerados os clientes escolhidos pela empresa, e o agrupamento realizado pela mesma. Como a empresa não realiza roteirização, considerou-se a rota gerada utilizando-se a meta-heurística *ILS* para o

PCV como uma boa aproximação. A quantidade considerada foi a efetivamente vendida para cada data de programação.

Para a situação proposta foram considerados os clientes definidos após a filtragem proposta, agrupados pelo *ILS* para agrupamento capacitado e roteirizados pelo *ILS* para o PCV. Considerou-se que uma boa aproximação para a quantidade seria a demanda dos clientes para a data, já que não foram programados clientes com restrições de entrega.

A tabela 5.12 apresenta os resultados obtidos. Na situação atual da empresa, o melhor índice atingido foi de 36kg de gás vendidos para cada quilômetro rodado. Na situação proposta, o índice chegou a atingir 67,7kg de demanda para cada quilômetro. Considerando todo o período estudado, na situação atual foram vendidos, em média, 26,4kg de gás por quilômetro rodado. Na situação proposta a média para o período seria de 45,5kg de produto por quilômetro. Esta diferença representa uma melhoria de 72%.

Tabela 5.12 – Quantidade demandada por distância. Comparação entre a situação atual e o método proposto

Data	Clientes e Agrupamentos atuais da empresa			Clientes propostos agrupados pelo ILS		
	Rota (km) ILS PCV	Quantidade (kg)	kg/km	Rota (km) ILS PCV	Quantidade (kg)	kg/km
05/dez	413,852	6.523	15,762	381,385	22.880	59,99
06/dez	369,507	13.310	36,021	249,511	4.308	17,27
07/dez	375,801	9.129	24,292	147,881	3.587	24,26
08/dez	374,270	11.306	30,208	176,359	7.757	43,98
09/dez	367,449	6.959	18,939	428,606	17.911	41,79
10/dez	336,062	6.711	19,970	339,274	22.978	67,73
12/dez	367,893	12.205	33,175	398,426	17.651	44,30
13/dez	376,127	9.947	26,446	196,166	7.067	36,03
14/dez	433,136	10.838	25,022	141,207	3.723	26,37
15/dez	402,923	11.264	27,956	243,587	12.777	52,45
16/dez	409,385	14.271	34,860	376,287	14.019	37,26
17/dez	392,144	9.611	24,509	395,944	23.270	58,77
Total	4.618,549	122.074	26,431	3.474,633	157.928	45,45

Fonte: A autora (2013).

6 CONCLUSÕES

Diversas melhorias resultaram dos métodos propostos, de forma que todos os objetivos do estudo de caso foram atingidos.

Houve melhoria da qualidade da programação dos atendimentos em termos de atendimento às restrições dos clientes. Este item é importante tanto para os clientes quanto para a empresa. O nível de serviço percebido pelos clientes é impactado quando a distribuidora define uma data de atendimento na qual o cliente não pode receber o produto. Para a empresa existe ainda o impacto nos custos, já que existem desperdícios de tempo e de distância percorrida que não geram venda real.

Aconteceu também melhoria da qualidade da programação dos atendimentos em termos de utilização da capacidade da empresa. A quantidade média de gás a ser vendido, por caminhão, aumentou 64%. Esta melhoria pode não ser diretamente percebida pelos clientes, porém tem impacto nos custos da empresa, já que deixar capacidade ociosa, mesmo tendo ainda clientes para atendimento, reduz a economia de escala e utilizar mais caminhões que o necessário aumenta os custos com funcionários, manutenção, combustível, entre outros.

Houve melhoria da qualidade dos agrupamentos realizados em termos de respeito às restrições de capacidade. Realizar agrupamentos que excedam a capacidade dos caminhões gera impacto negativo no nível de serviço oferecido, pois um ou mais clientes programados para entrega não serão atendidos por falta de produto no caminhão, podendo gerar atrasos e falta de produto para os clientes.

Houve redução de 74,5% dos atrasos de programação de atendimentos. Os atrasos geram custo de falta de produto e diminuição da confiabilidade do serviço oferecido. A confiabilidade das entregas é fundamental para o estoque gerenciado pelo fornecedor, que deve focar tanto na programação mais eficiente da distribuição quanto no nível de serviço oferecido aos clientes. A redução não chegou a 100% apenas em função das dimensões inapropriadas dos tanques de alguns clientes.

Houve também redução das distâncias dos pontos às suas medianas nos agrupamentos. Considerando apenas a mudança no método de agrupamento a redução foi de 11%, porém, ao considerar a combinação da filtragem dos clientes com o método de agrupamento, a redução chegou a 31,8%. Quanto menores as distâncias dos clientes às medianas, mais próximos estarão os pontos de

atendimento de cada caminhão, o que potencialmente reduz as distâncias percorridas.

A definição das rotas utilizando o Problema do Caixeiro Viajante é uma aproximação, primeiramente em função de o cálculo ser realizado com distâncias Euclidianas, mas também por não serem considerados os problemas de trânsito, obras públicas, entre outros, que estão em constante mudança. A experiência dos motoristas continua sendo muito importante para definir a melhor rota real a ser percorrida. O resultado da roteirização não é o caminho exato a ser percorrido, mas sim uma boa ordem pela qual os clientes podem ser atendidos de forma a potencialmente reduzir a distância total percorrida. Utilizar as melhores rotas melhora a economia de distância diminuindo os custos de transporte da empresa.

Uma grande melhoria da relação $\frac{\text{quantidade de kg vendidos}}{\text{km percorridos}}$ foi atingida, com um aumento médio de 72%. Esta aproximação indica a diferença de eficiência entre o método atual e a combinação dos métodos propostos.

Com a combinação das propostas foi possível melhorar a confiabilidade do sistema de distribuição da empresa, melhorando o nível de serviço, além de melhorar diversos itens que têm impacto nos custos da empresa. Desta forma, a utilização do sistema de estoque gerenciado pelo fornecedor é viabilizada, trazendo benefícios tanto para os clientes quanto para a empresa, a qual pode trabalhar de maneira mais eficiente e pode inclusive buscar novos clientes e novas regiões de atendimento.

A Meta-heurística ILS foi utilizada para resolver o problema de agrupamento capacitado. O desempenho foi satisfatório, tanto para o estudo de caso quanto para as instâncias da literatura, com um erro inferior a 3% quando comparado à solução ótima, e tempo computacional quase instantâneo. Apesar de o método exato também ter necessitado de pouco tempo computacional, ele tem duas grandes desvantagens. A primeira é em relação ao custo de aquisição e manutenção de um software capaz de resolver problemas de otimização. A segunda é em função do aumento significativo de tempo computacional necessário conforme é aumentado o tamanho do problema, o que traria dificuldades no caso de expansão da empresa ou aplicação do método em problemas maiores.

A Meta-heurística ILS foi também utilizada para resolver o Problema do Caixeiro Viajante, e obteve bons resultados. Esta Meta-heurística já foi testada

diversas vezes na literatura com aplicações do PCV. O maior ganho neste trabalho foi, então, a aplicação da mesma ao Problema de Agrupamento Capacitado.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização do trabalho surgiram diversas oportunidades para desenvolvimento de mais trabalhos, algumas das quais são citadas a seguir:

- Redimensionar o tamanho dos tanques dos clientes. Como visto anteriormente, alguns clientes apresentam tanques em tamanho inferior às suas necessidades.
- Separar tempo de transporte e tempo de setup. Foi utilizada uma aproximação para definir que poderiam ser atendidos 18 clientes por dia. Pode-se realizar um estudo para saber quanto tempo é necessário para o abastecimento em si dos clientes, e quanto tempo é utilizado em trânsito. Este último pode ser calculado com base na distância a ser percorrida e a quilometragem esperada de cada região.
- Rever localização da empresa. Uma grande parte da distância percorrida é em função da distância da empresa aos locais de maior concentração de clientes. Pode-se fazer um estudo da viabilidade de mudança de local, considerando os custos e implicações legais.
- Analisar o nível de serviço pela visão do cliente. Foi analisado o nível de serviço na visão da empresa, representado pelos atrasos de entrega, que geram falta de produto para os clientes, e pelas tentativas de entrega em momentos que o cliente não pode receber o produto. Seria interessante realizar um estudo sobre quais são os itens que definem o nível de serviço oferecido, na visão dos clientes.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, A. C. e NOVAES, A. G. N. **Logística Aplicada: Suprimento e Distribuição Física**. 3ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2000.
- ANDRADE, L. e CUNHA, C. Algoritmo de Colônia Artificial de Abelhas para um Problema de Clusterização Capacitado. In:XLIII SBPO. **Anais...** Ubatuba, SP, 2011.
- BALDACCI, R., HADJICONSTANTINO, E., MANIEZZO, V. e MINDOZZI, A. A new method for solving capacitated location problems based on a set partitioning approach. **Computers & Operations Research**. V. 29, p.365–386, 2002.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/ Logística Empresarial**. 5ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- BEASLEY, J.E. **OR-Library: distribution test problems by electronic mail**. Journal of Operational Research Society. V. 41, p. 1069-1072, 1990.
- BAUM, E. Iterated descent: A better algorithm for local search in combinatorial optimization problems. **Technical report**, Caltech, Pasadena, CA, 1986.
- BELFIORE, P. P., COSTA, O. L. V. e FÁVERO, L. P. L. Problema de estoque e roteirização: revisão bibliográfica. **Produção**. V.16, n. 3, p.442-454, dez, 2006.
- BENEVIDES, P. **Aplicação de Heurísticas e Meta-heurísticas para o Problema do Caixeiro Viajante em um Problema Real de Roteirização de Veículos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.
- BOAVENTURA NETTO, P. O. **Grafos: Teoria, Modelos, Algoritmos**. São Paulo; E. Blücher, 2006.
- BOCCIA, M., SFORZA, A., STERLE, C. e VASILYEV, I. A Cut and Branch Approach for the Capacitated p-Median Problem Based on Fenchel Cutting Planes. **Jornal of Mathematical Modelling and Algorithms.**, V.7, p.43-58, 2008.
- BODIN, L., GOLDEN, B., ASSAD, A. and BALL, M. Routing and Scheduling of vehicles and crews. **Special edition of Computer and Operations Research**. V. 10, n.2, 1983.
- BOWERSOX, D. e CLOSS, D. **Logística empresarial: o processo de integração da cadeia de suprimento**. São Paulo: Atlas, 2010.
- BRASILEIRO, L. A. e LACERDA, M. G. Análise do uso de SIG no roteamento dos veículos de coleta de resíduos sólidos domiciliares. **Engenharia Sanitária Ambiental**. V.13, n.4, p.356-360, dez de 2008.

BRITO, J., MONTENEGRO, F., OCHI, L. e BRITO, L. Algoritmo ILS Aplicado ao Problema das k-Medianas Capacitado. In: SPOLM 2008. **Anais...** Rio de Janeiro, agosto de 2008.

CESELLI, A. e RIGHINI, G. A branch-and-price algorithm for the capacitated p-median problem. **Networks**. V.45, p.125–142, 2005.

CHOPRA, S. e MEINDL, P. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Estratégia, Planejamento e Operação**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.

CHRISTOPHER, M. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: criando redes que agregam valor**. 2ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

CUNHA, C. B. Aspectos Práticos da Aplicação de Modelos de Roteirização de Veículos a Problemas Reais. **Transportes**. V. 8, n. 2, p. 51-74, 2000.

DAIBERT, G. B. D. **Implantação do VMI – Vendor Managed Inventory – em uma Empresa da Indústria Aeronáutica**. Dissertação de mestrado. Engenharia Aeronáutica e Mecânica. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 2009.

ENOMOTO, L. M. e LIMA, R. S. Análise da distribuição física e roteirização em um atacadista. **Produção**. V.17, n. 1, p.94-108, abril de 2007.

FLESZARA, K. e HINDI, K. S. An effective VNS for the capacitated p-median problem. **European Journal of Operational Research**. V.191, p.612–622, 2008.

FRANÇA, P. M., SOSA, N. M. e PUREZA, V. An Adaptive Tabu Search Algorithm for the Capacitated Clustering Problem. **International Transactions in Operational Research**. V. 6, p.665-678, 1999.

FURTADO, J. C. **Algoritmo genético construtivo na otimização de problemas combinatoriais de agrupamentos**. Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 1998.

HILLIER, F. e LIEBERMAN, G. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 8ªed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

LORENA, L. A. N. e SENNE, E. L. F. Local Search Heuristics for Capacitated p-Median Problems. **Networks and Spatial Economics**. V. 3, p.407-419, 2003.

LORENA, L. A. N. e SENNE, E. L. F. A column generation approach to capacitated p-median problems. **Computers & Operations Research**. V. 31, p.863–876, 2004.

LOURENÇO, H., MARTIN, O. e STÜTZLE, T. **Iterated local search**. In: **Handbook of Metaheuristics**. Boston: Kluwer Academic Publishers, p. 321-353, 2002.

MELO, A. C. S. e FERREIRA FILHO, V. J. M. Sistemas de roteirização e programação de veículos. **Pesquisa Operacional [online]**. V.21, n.2, p. 223-232, 2001.

OSMAN, I. H. e CHRISTOFIDES N. Capacitated clustering problems by hybrid simulated annealing and tabu search. **International Transactions in Operational Research**. V. 1, n. 3, p. 317-336, 1994.

PENNA, P., SUBRAMANIAN, A e OCHI, L. An iterated local search heuristic for the heterogenous Fleet vehicle routing problem. **Journal of Heuristics**, 2011.

RIBEIRO, C.,ALOISE, D., NORONHA, T. ROCHA, C. e URRUTIA, S. An eficiente implementation of a VNS/ILS heuristic for a real-life car sequencing problem. **European Journal of Operational Research**. V. 191, p.596–611, 2008.

SCHEUERER, S. e WENDOLSKY, R. A scatter search heuristic for the capacitated clustering problem. **European Journal of Operational Research**. V. 169, p.533–547, 2006.

STEFANELLO, F. e MÜLLER, F. Um Estudo Sobre Problemas de Agrupamento Capacitado. In: XLI SBPO. **Anais...** Porto Seguro, 2009.

STÜTZLE, T. e HOOS, H.. Analyzing the run-time behaviour of iterated local search for the TSP . In:**Proceedings of the Third Metaheuristics International Conference**. Angra dos Reis, Rio de Janeiro: p 449-453, 1999.

SUBRAMANIAN, A. **Meta-heurística Iterated Local Search aplicada ao Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega Simultânea**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal da Paraíba, 2008.

WILSON, R. e WATKINS, J. **Graphs: an introductory approach: a first course in discrete mathematics**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1989.

ZNAMENSKI, A. **Heurísticas para o Problema de Distribuição com Estoques Geridos pelo Fornecedor**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

ZNAMENSKI, A. e CUNHA, C. B. O problema de estoque-roteirização com demanda determinística. **Transportes**. V.11, nº2, 2003.

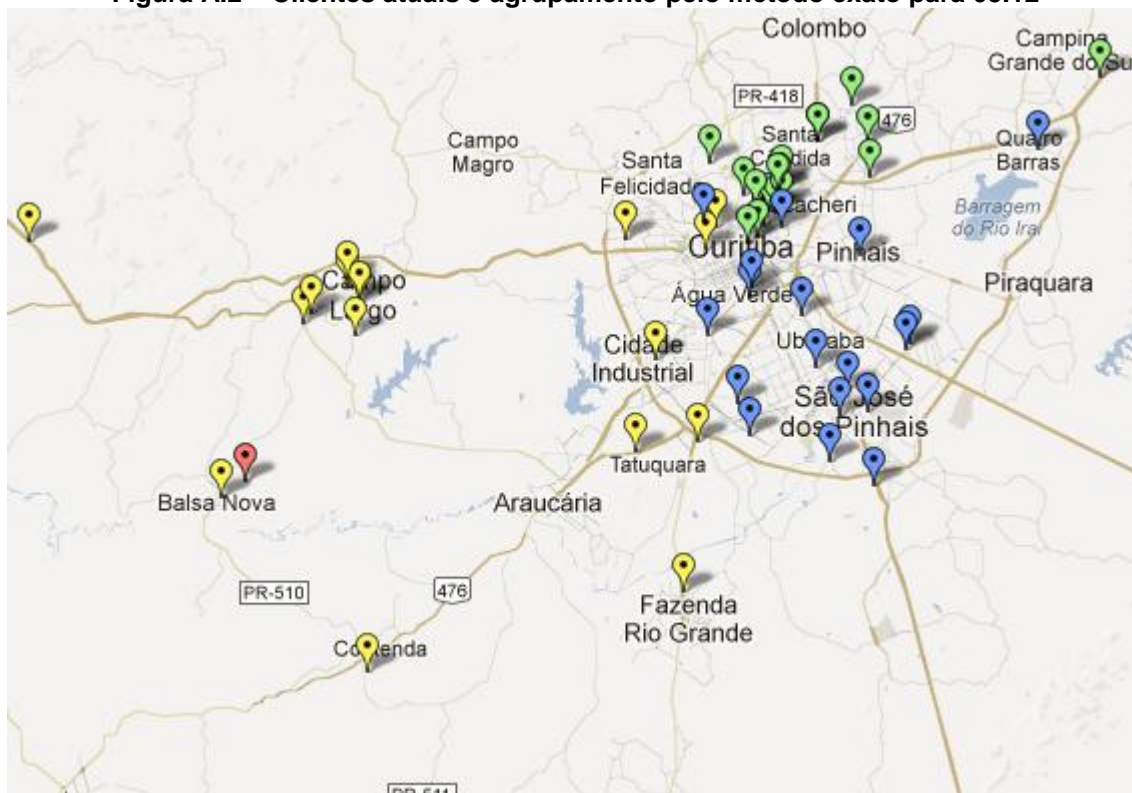
APÊNDICE A – AGRUPAMENTOS

Figura A.1 – Clientes atuais e agrupamento atual para 05.12



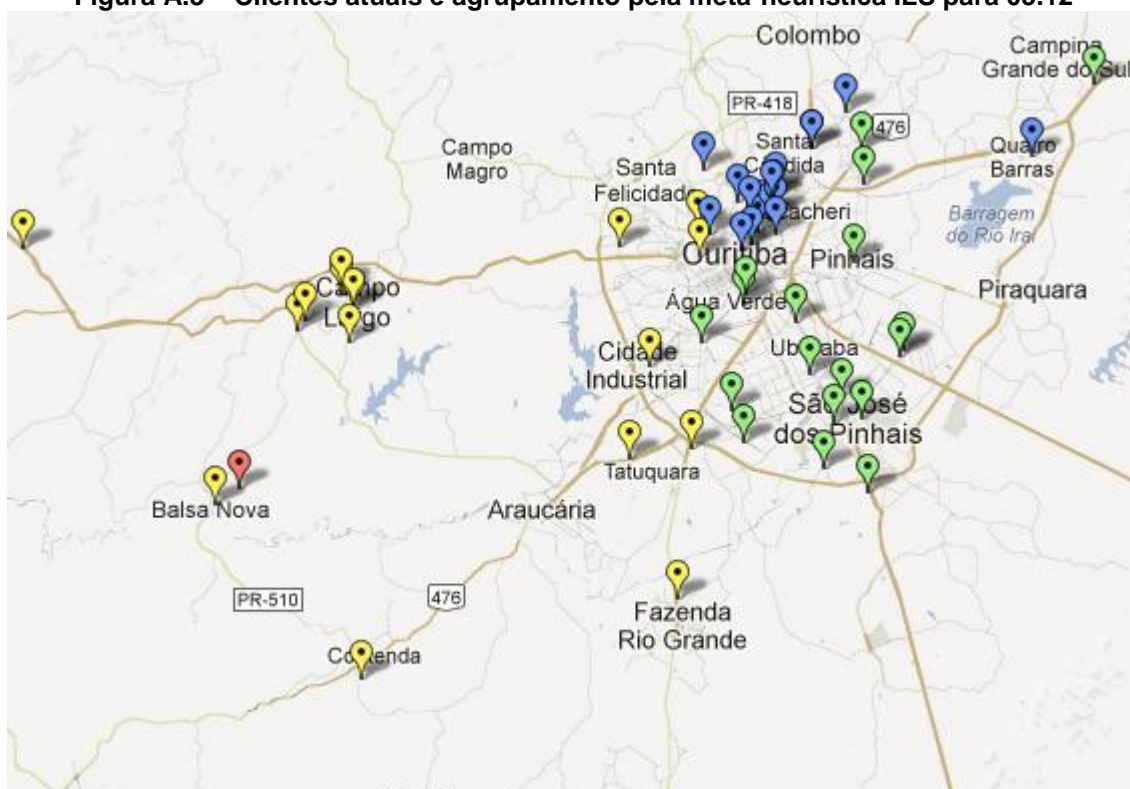
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.2 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 05.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.3 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 05.12



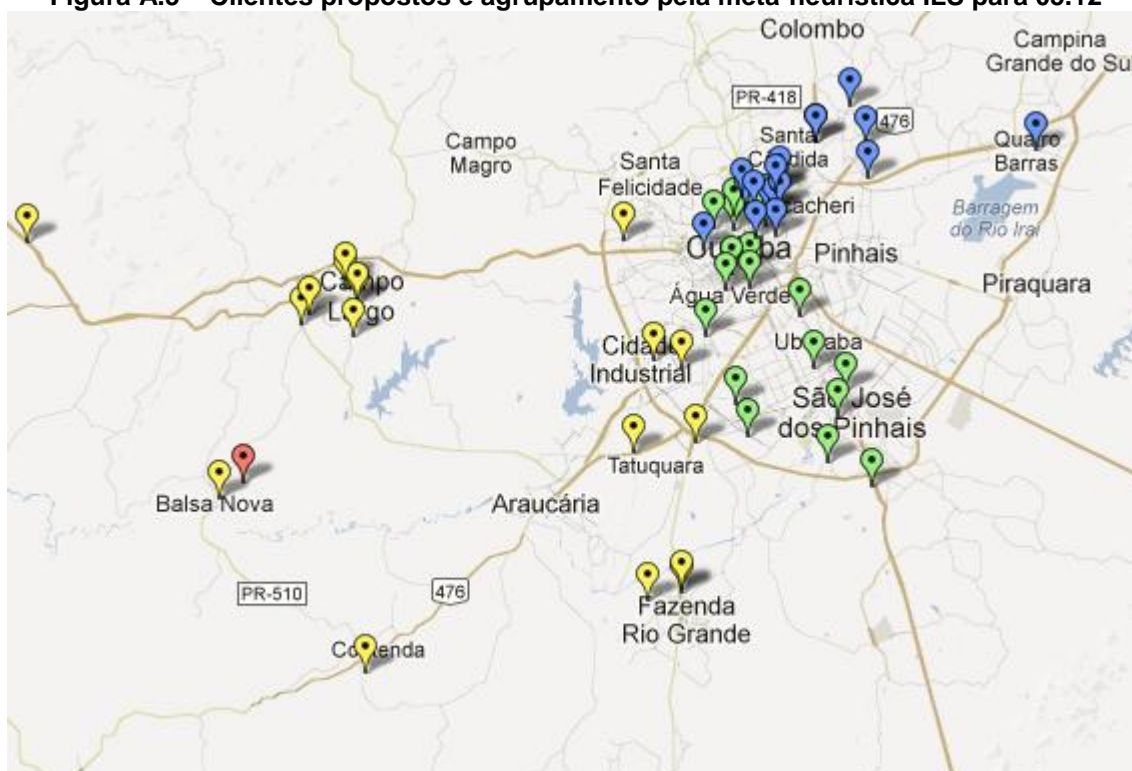
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.4 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 05.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.5 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 05.12



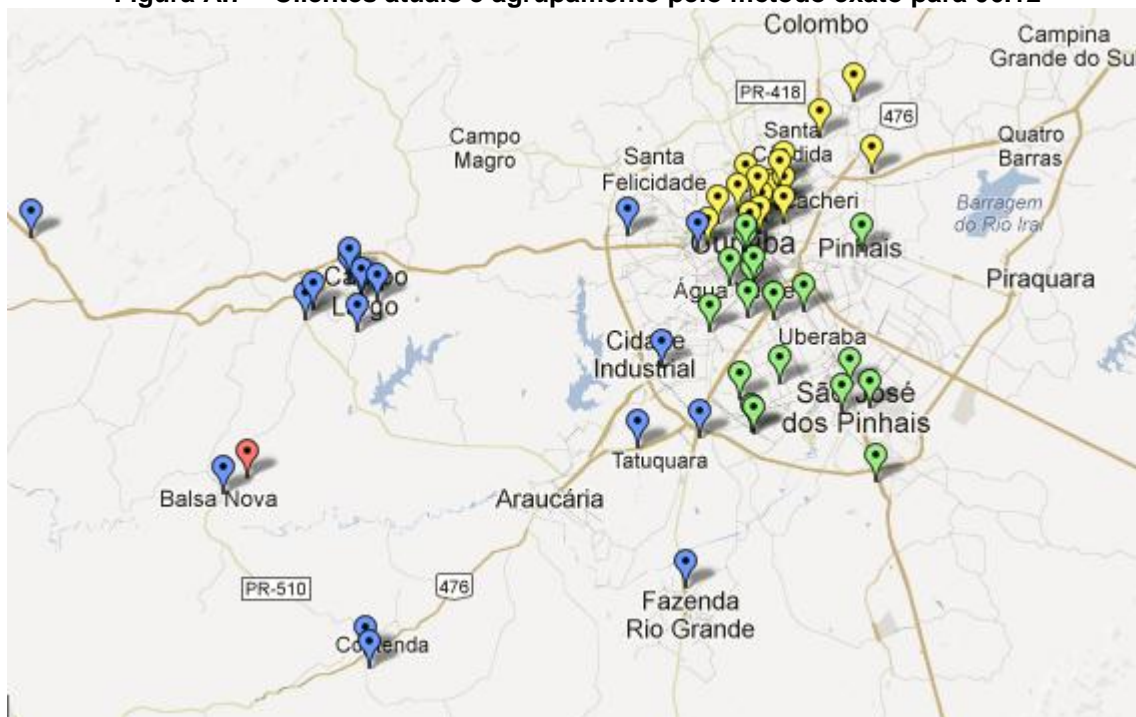
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.6 – Clientes atuais e agrupamento atual para 06.12



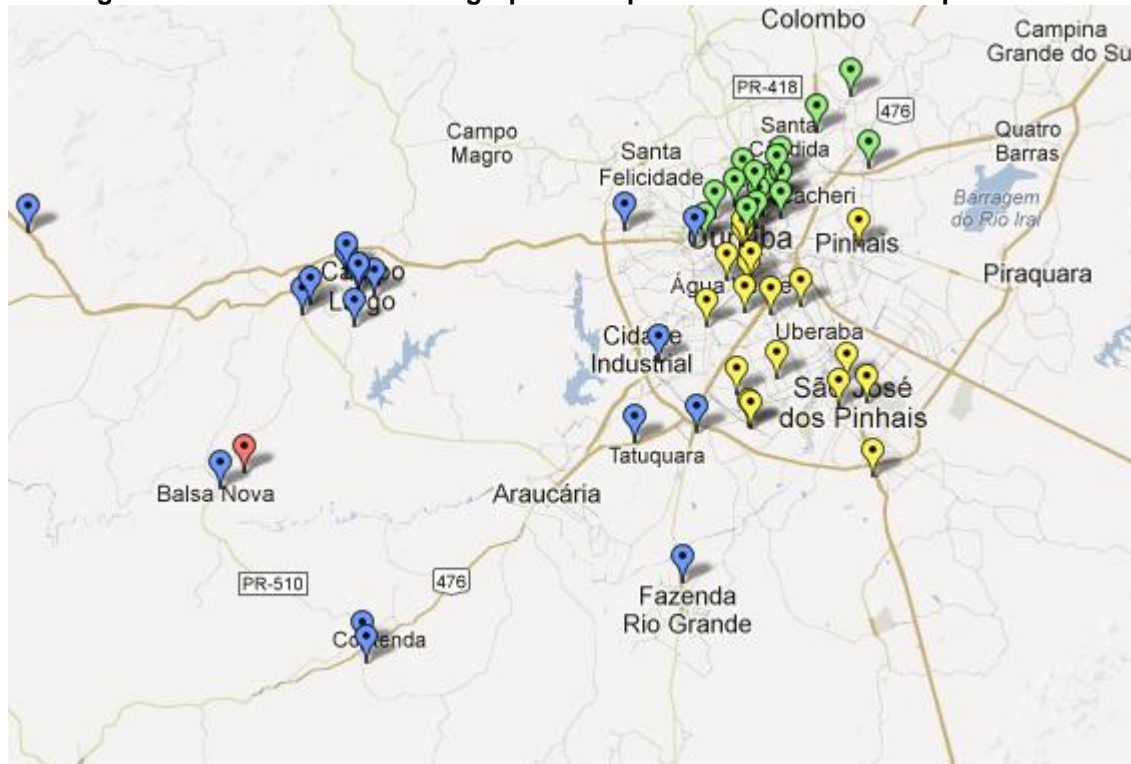
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.7 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 06.12



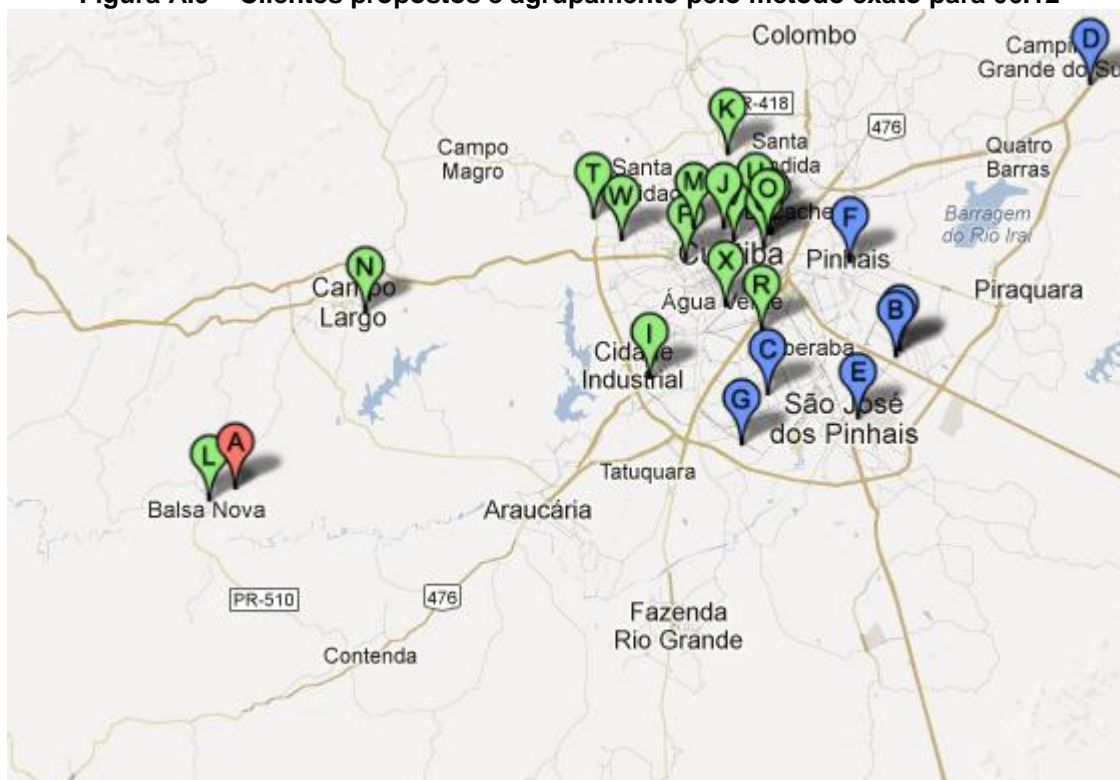
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.8 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 06.12



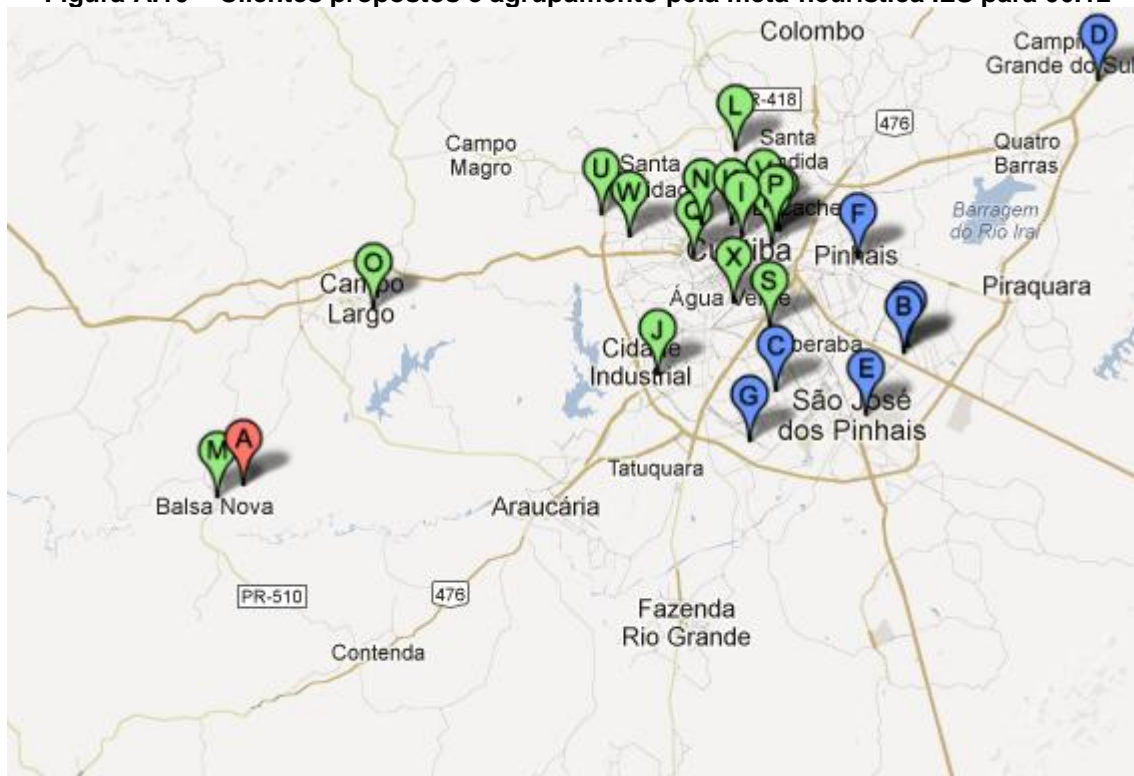
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.9 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 06.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.10 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 06.12



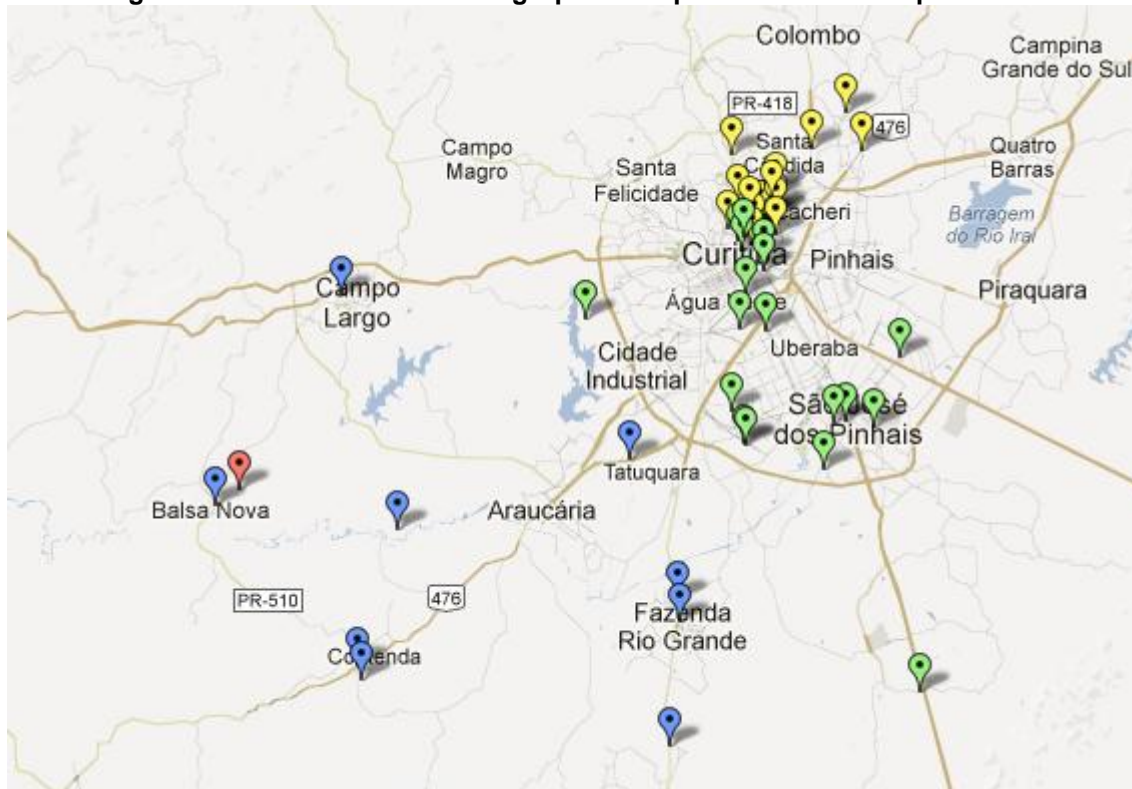
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.11 – Clientes atuais e agrupamento atual para 07.12



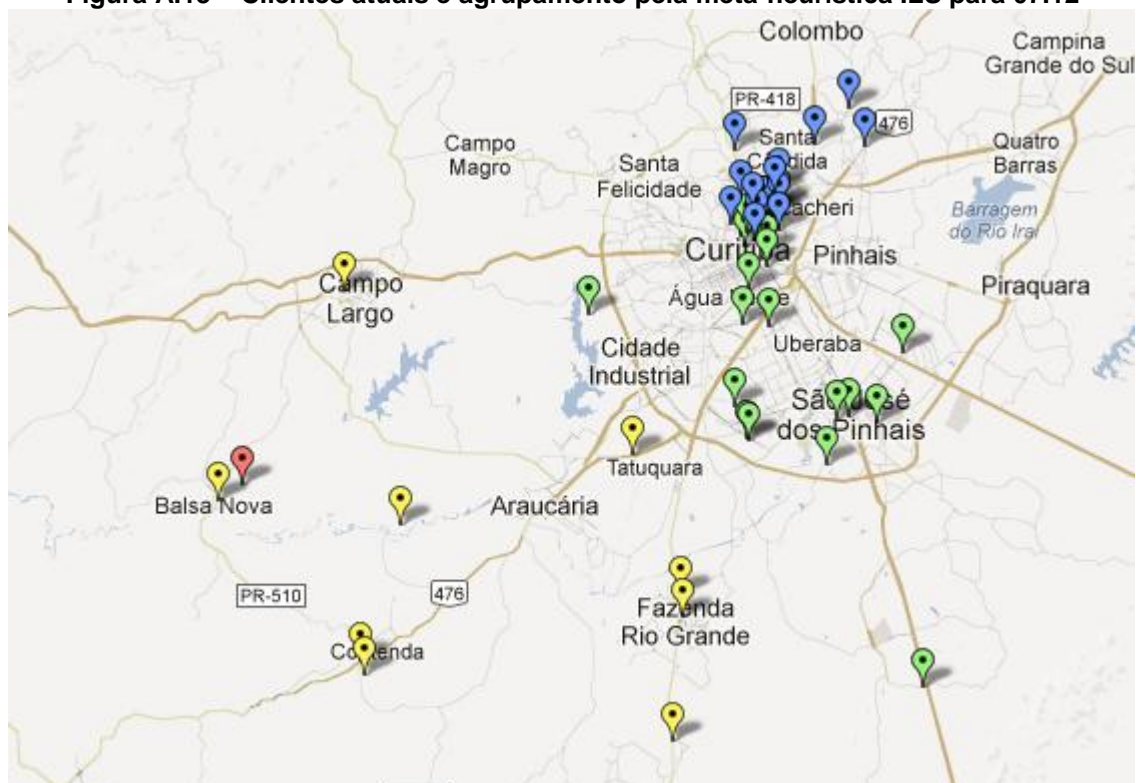
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.12 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 07.12



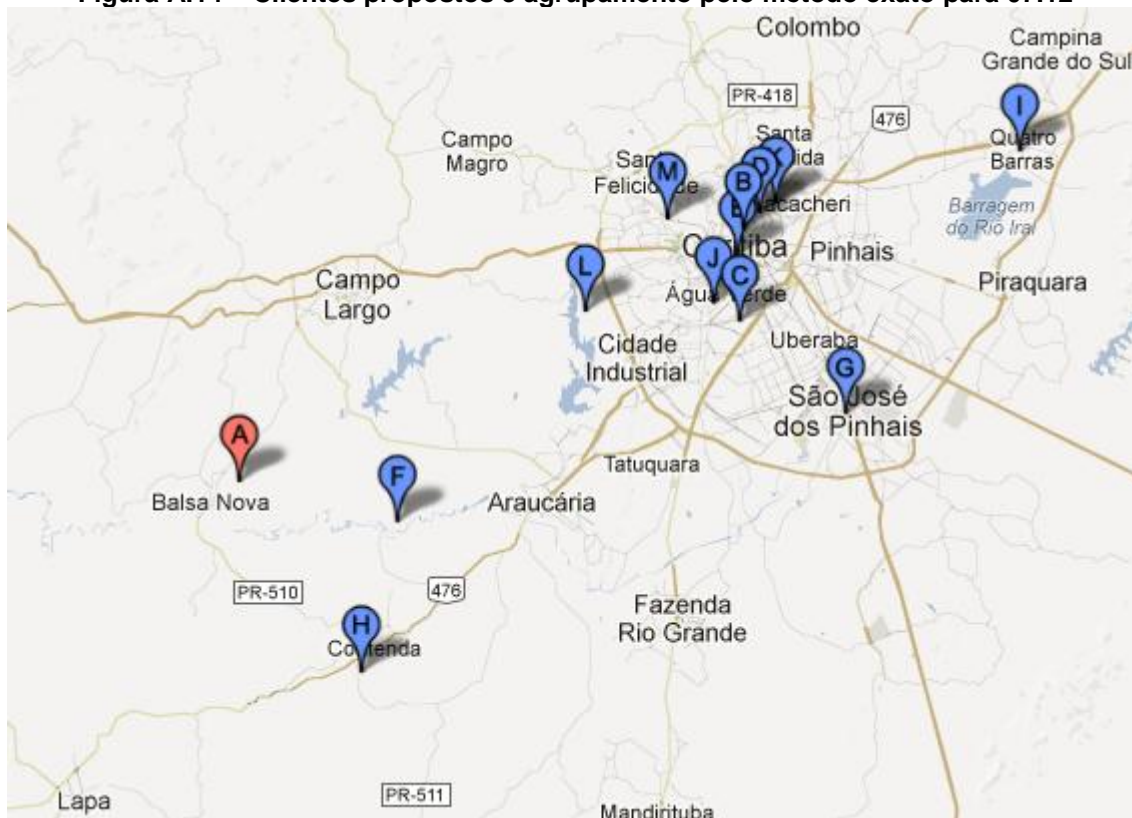
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.13 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 07.12



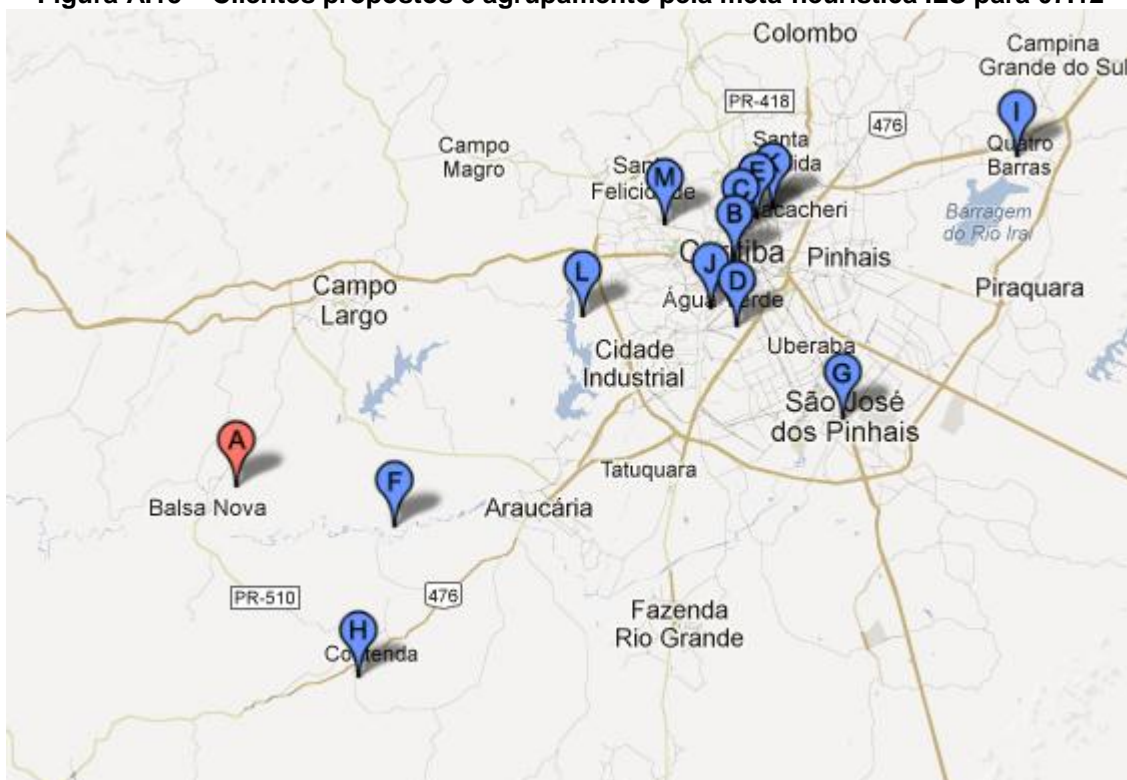
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.14 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 07.12



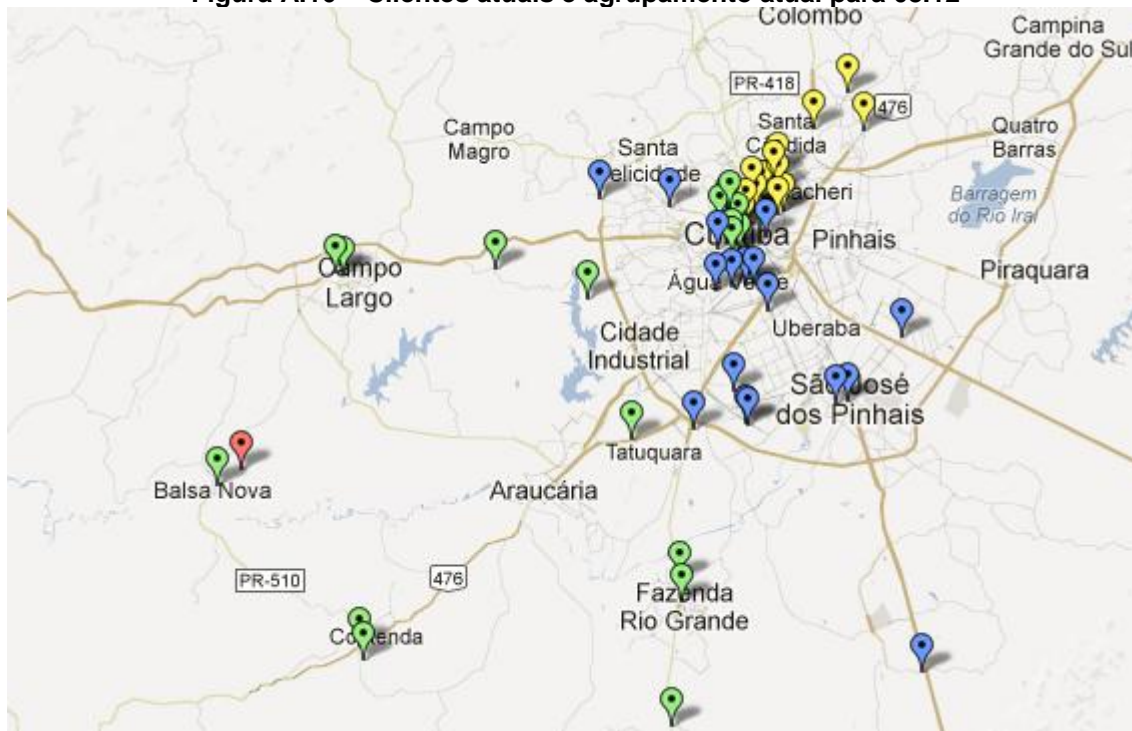
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.15 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 07.12



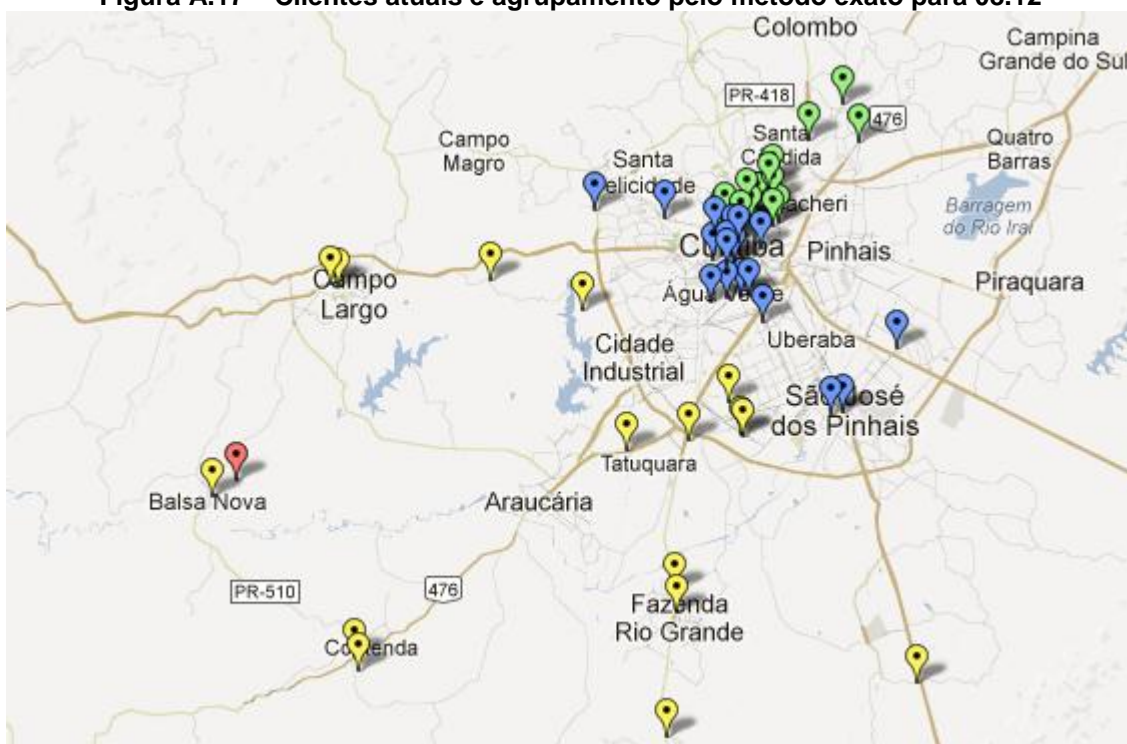
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.16 – Clientes atuais e agrupamento atual para 08.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.17 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 08.12



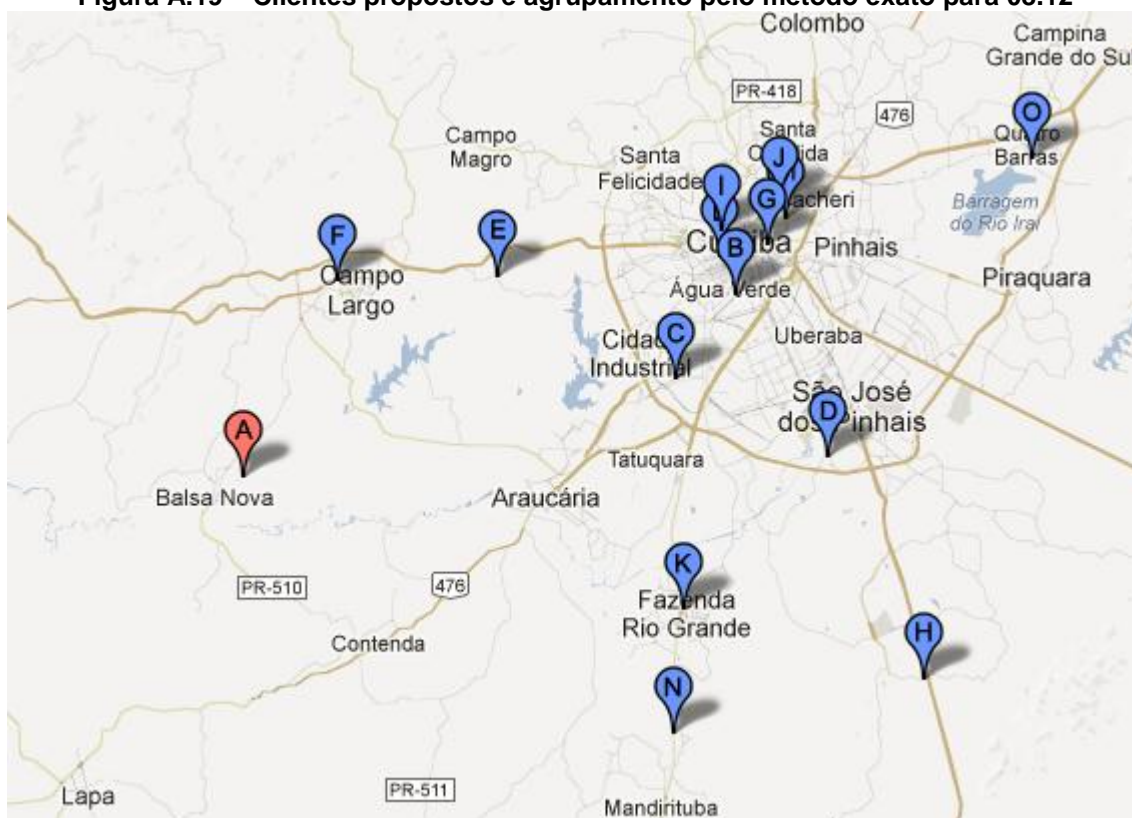
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.18 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 08.12



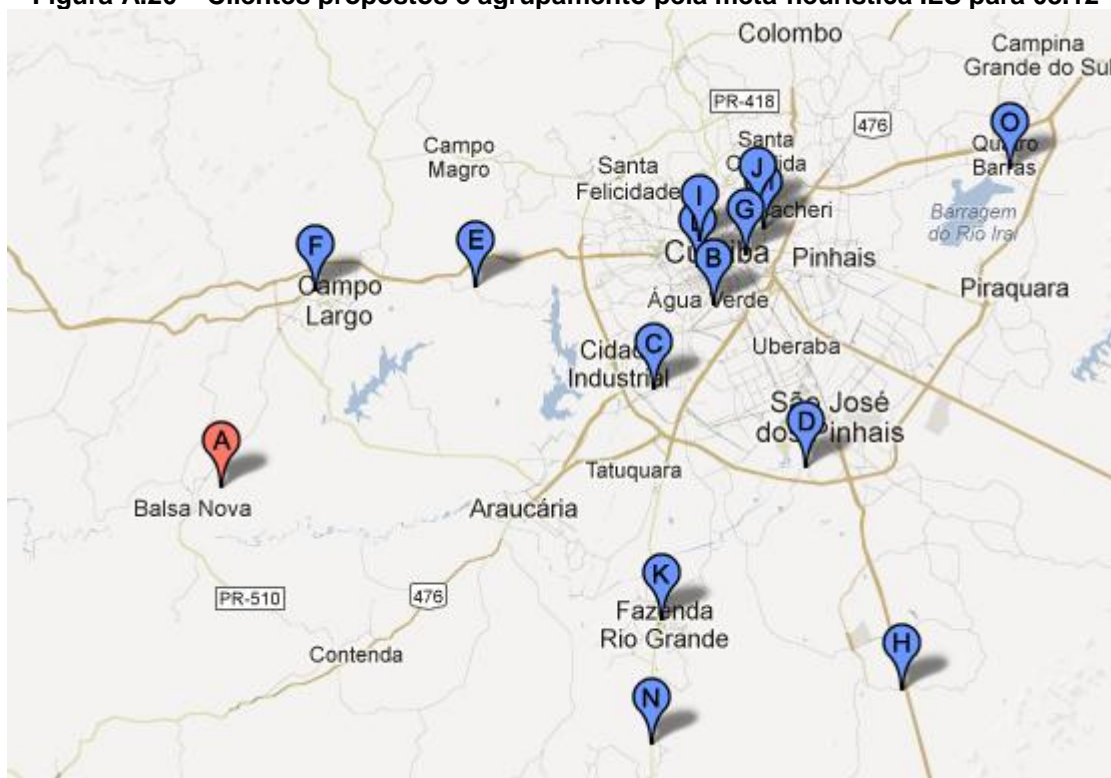
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.19 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 08.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.20 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 08.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.21 – Clientes atuais e agrupamento atual para 09.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.22 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 09.12



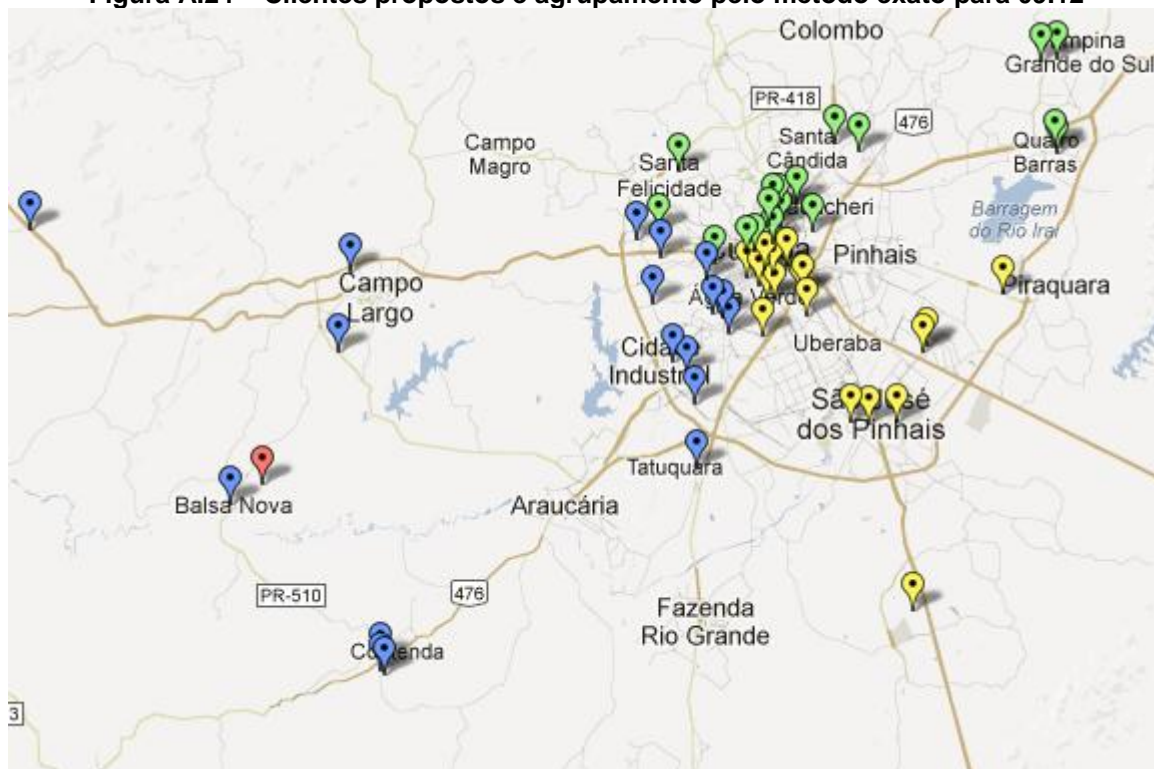
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.23 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 09.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.24 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 09.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.25 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 09.12



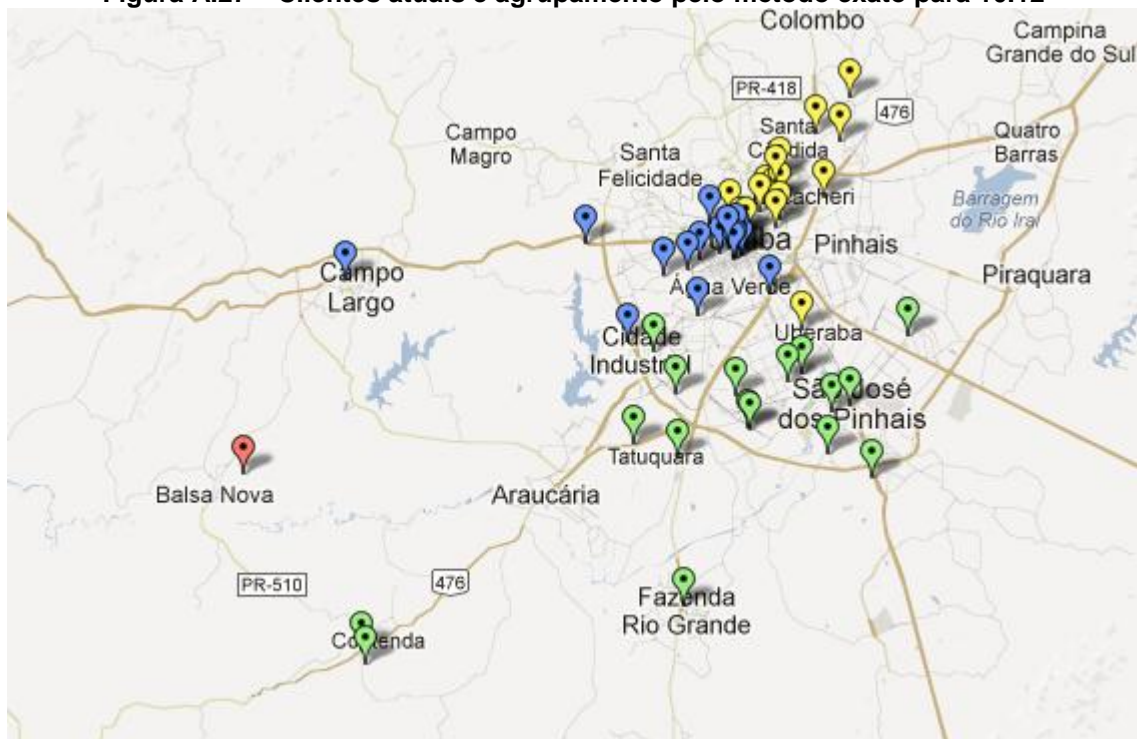
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.26 – Clientes atuais e agrupamento atual para 10.12



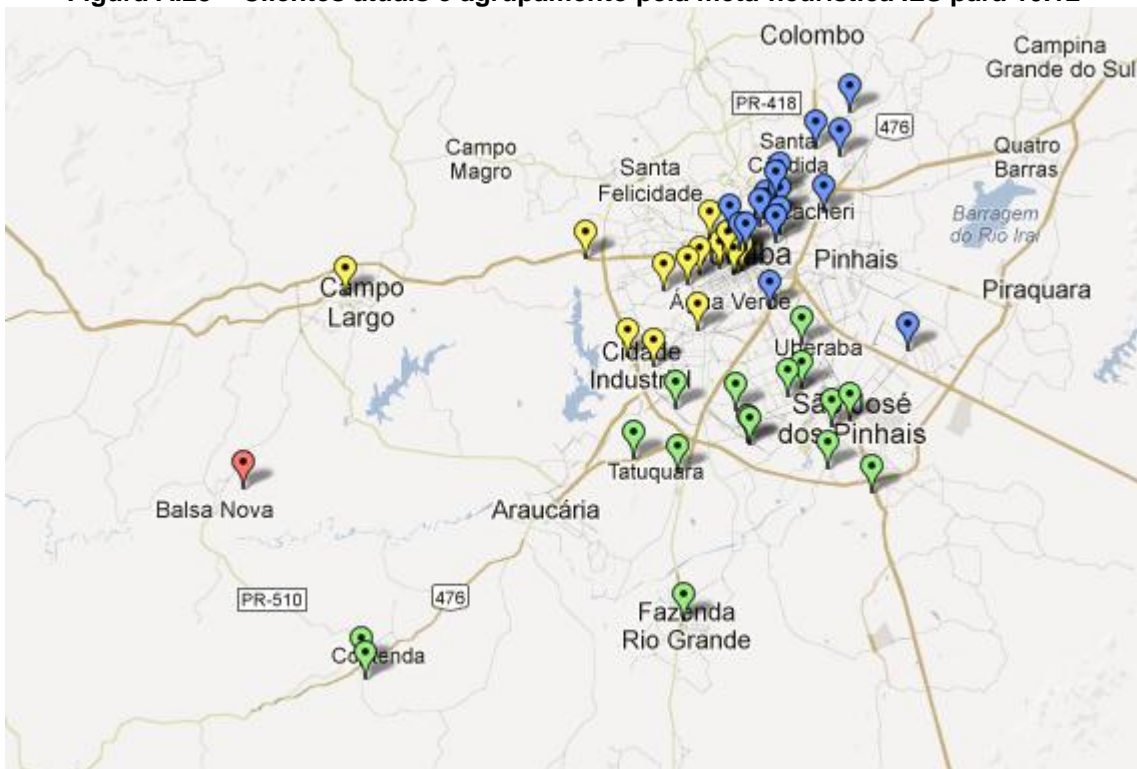
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.27 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 10.12



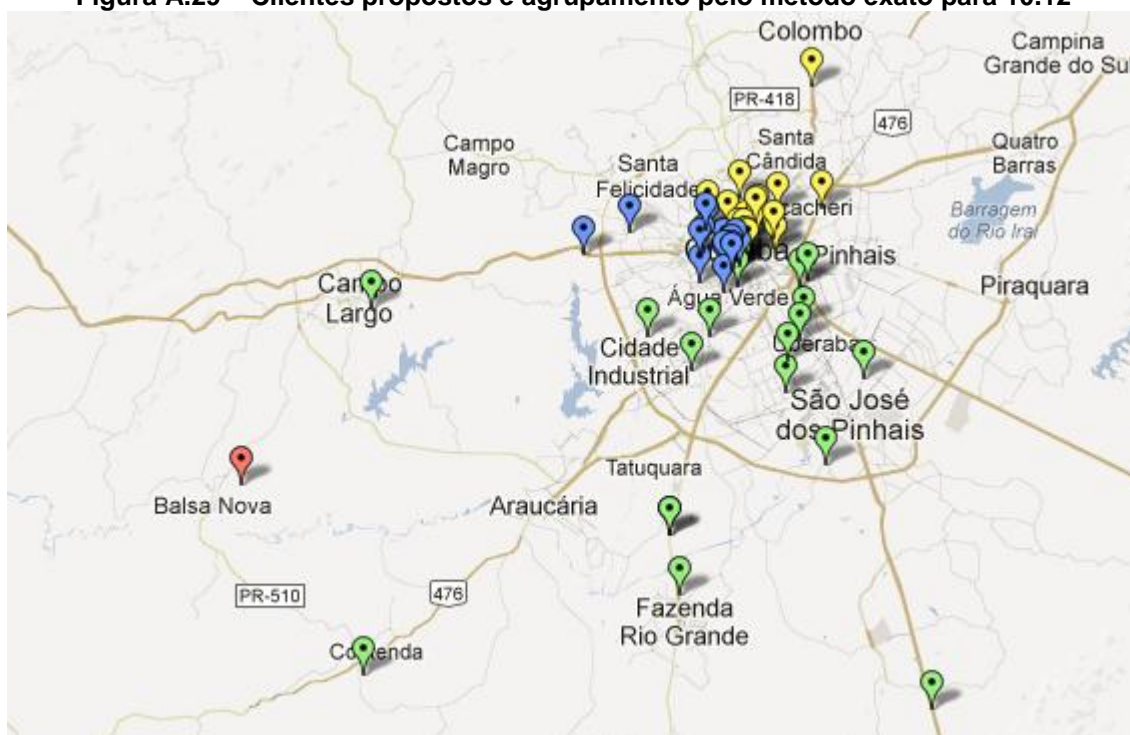
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.28 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 10.12



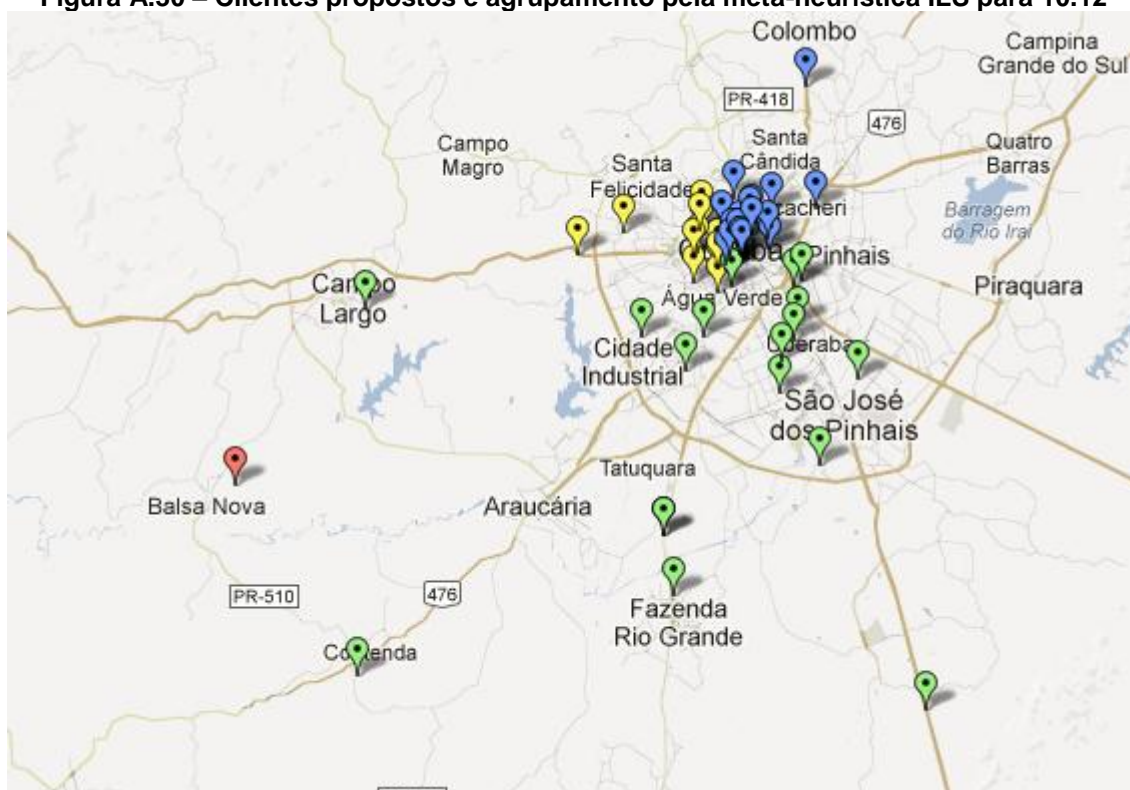
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.29 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 10.12



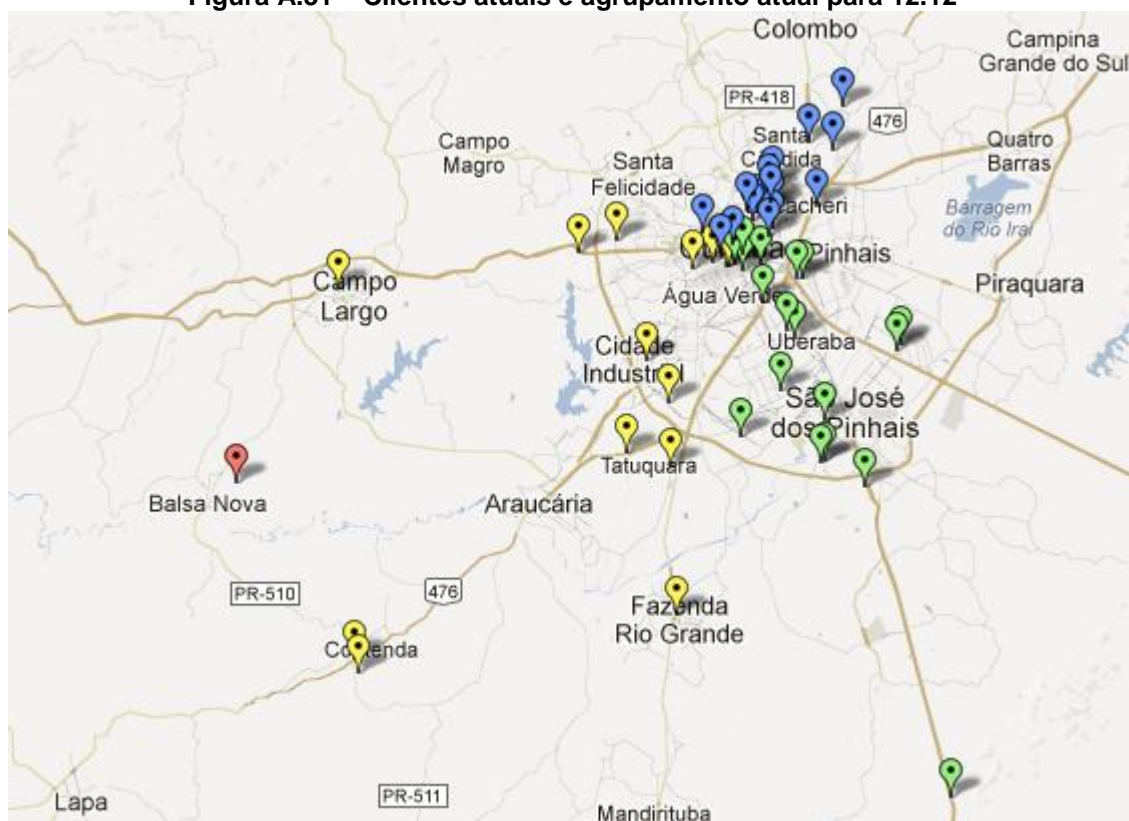
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.30 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 10.12



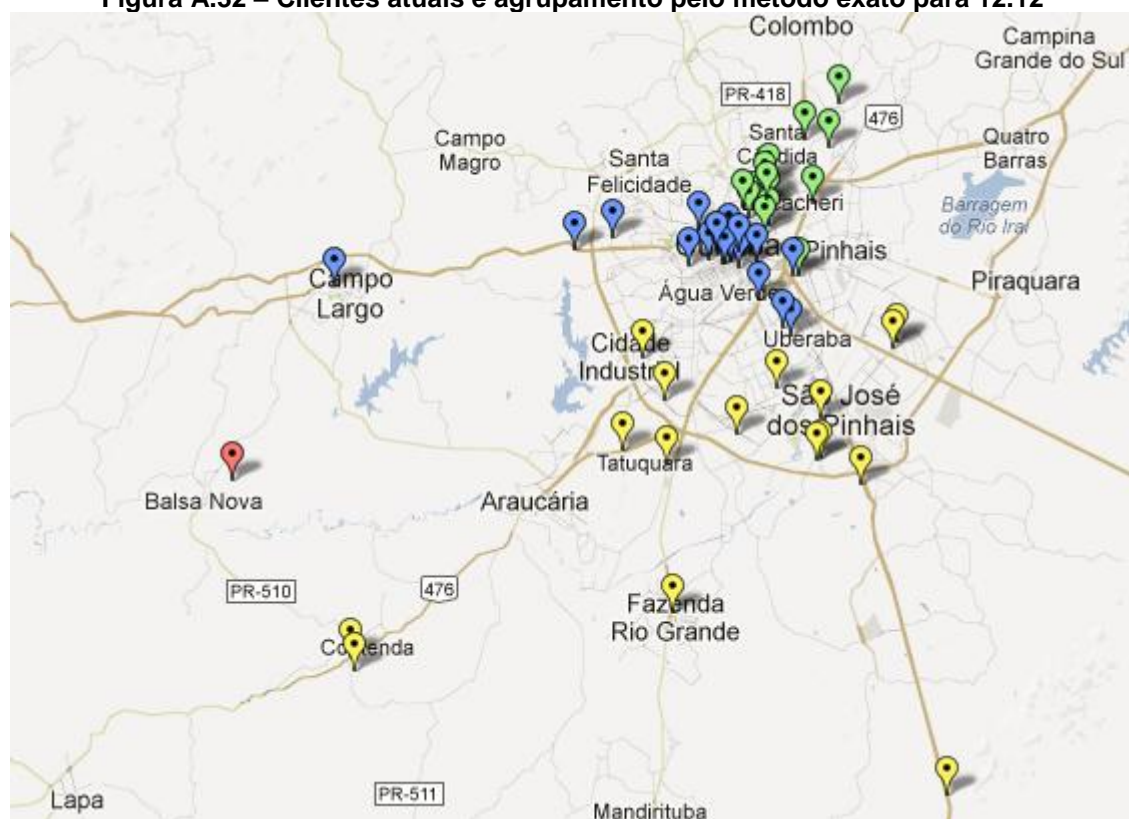
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.31 – Clientes atuais e agrupamento atual para 12.12



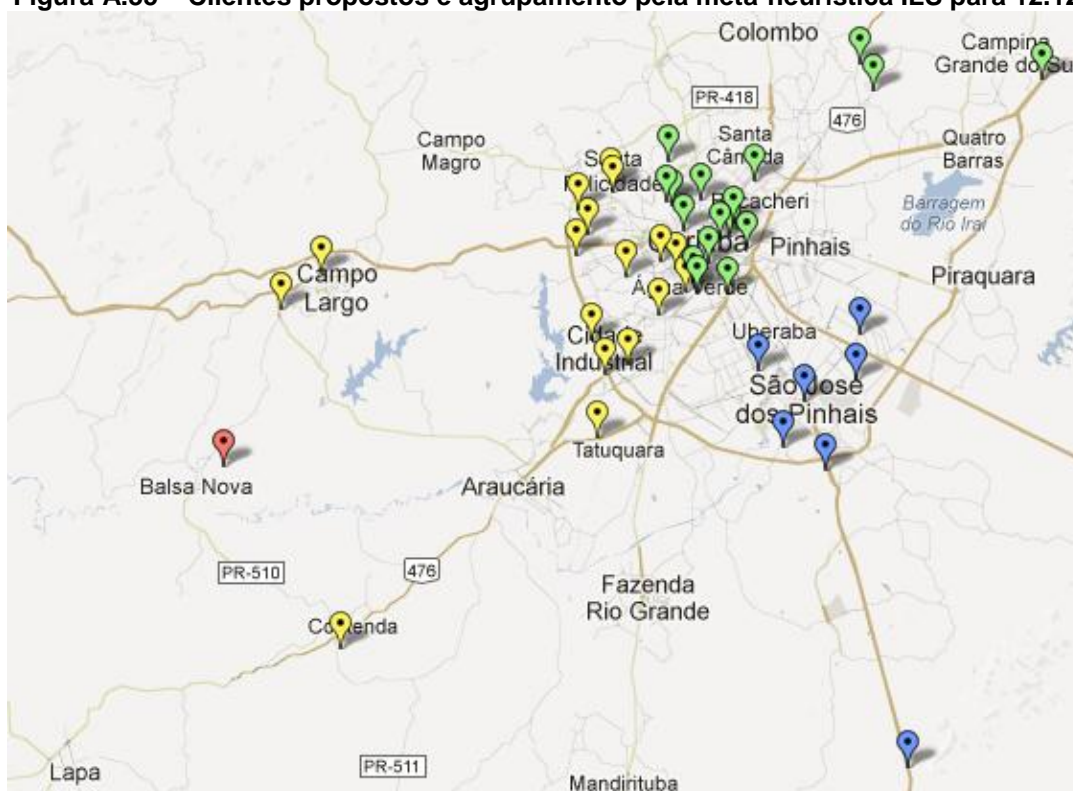
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.32 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 12.12



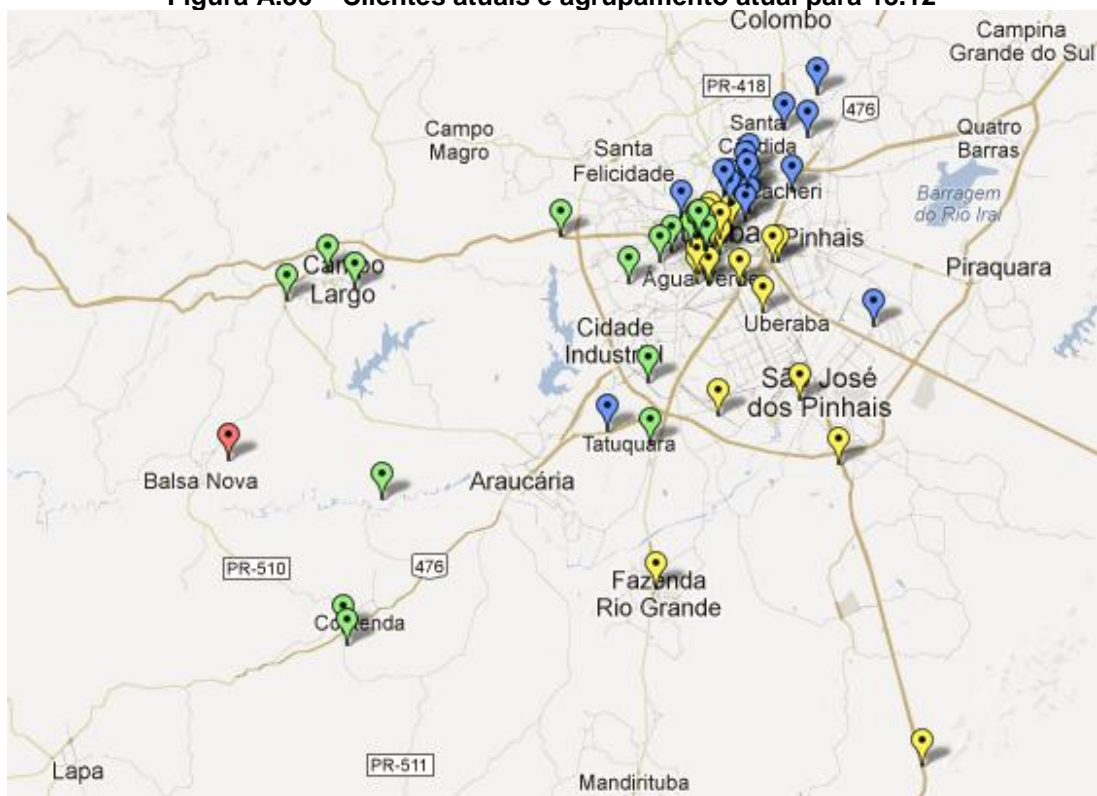
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.35 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 12.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.36 – Clientes atuais e agrupamento atual para 13.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.37 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 13.12



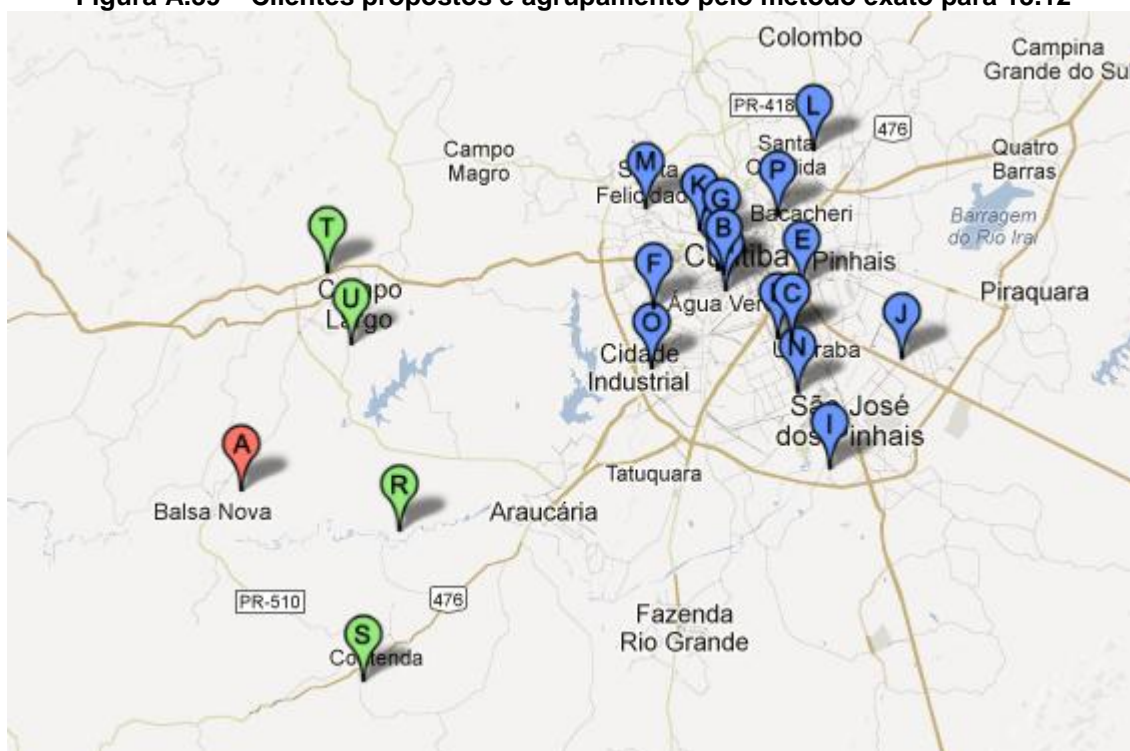
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.38 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 13.12



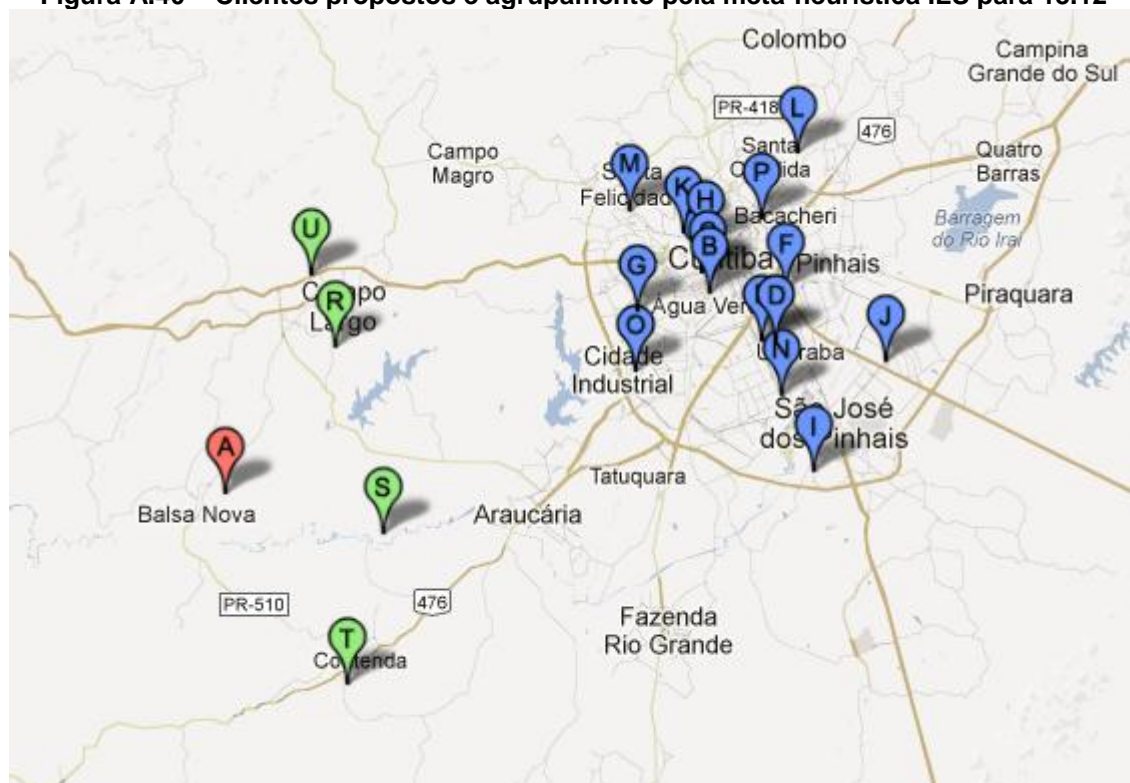
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.39 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 13.12

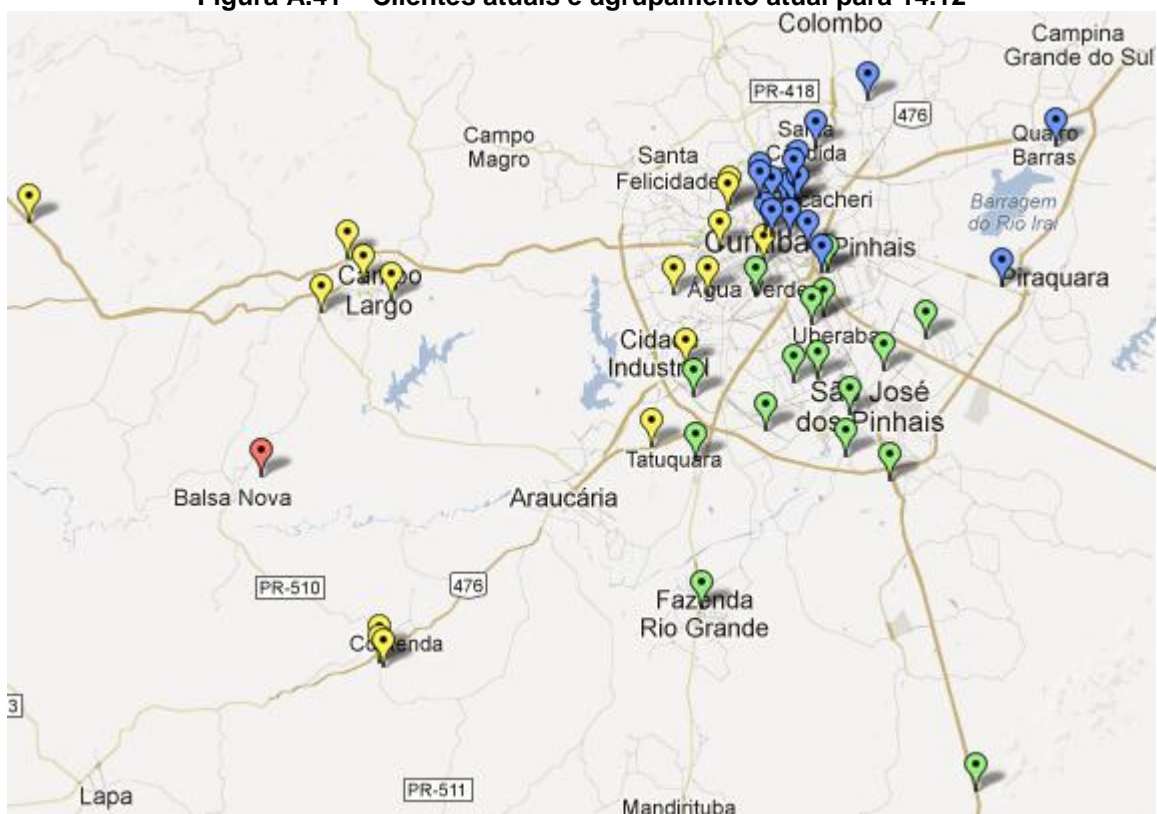


Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

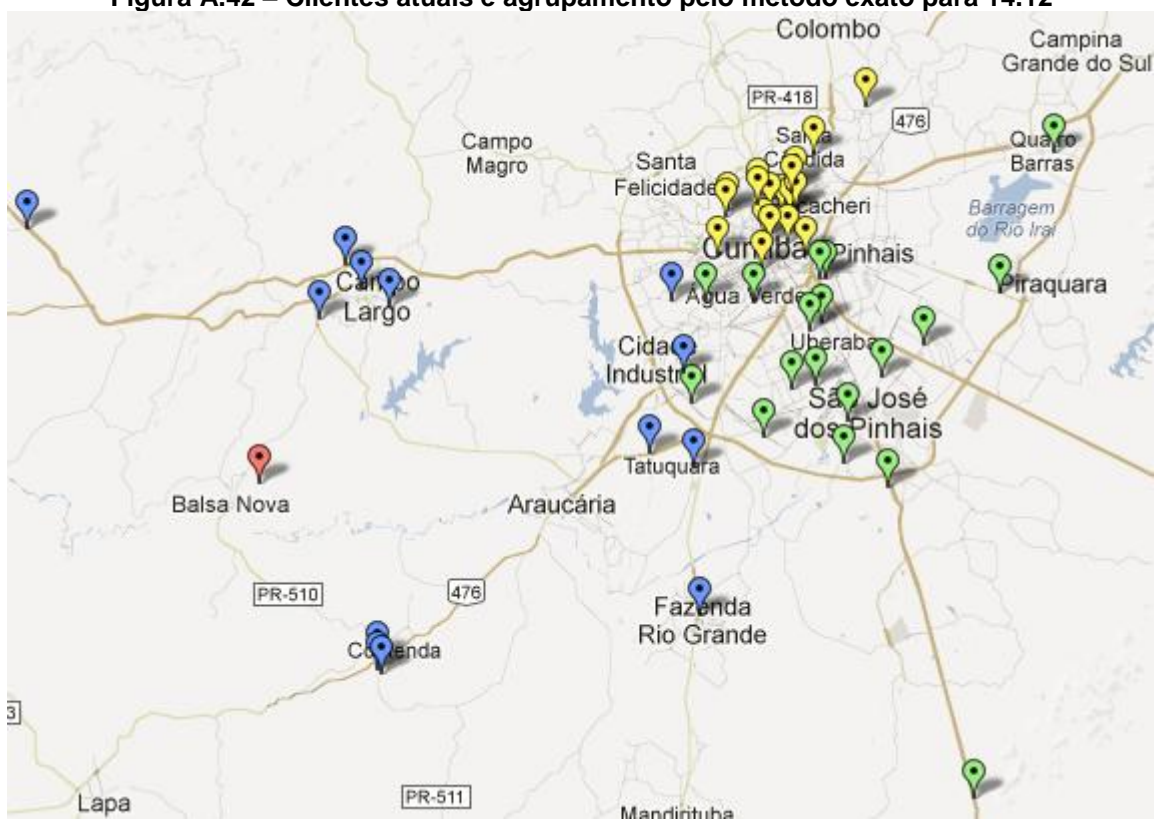
Figura A.40 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 13.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

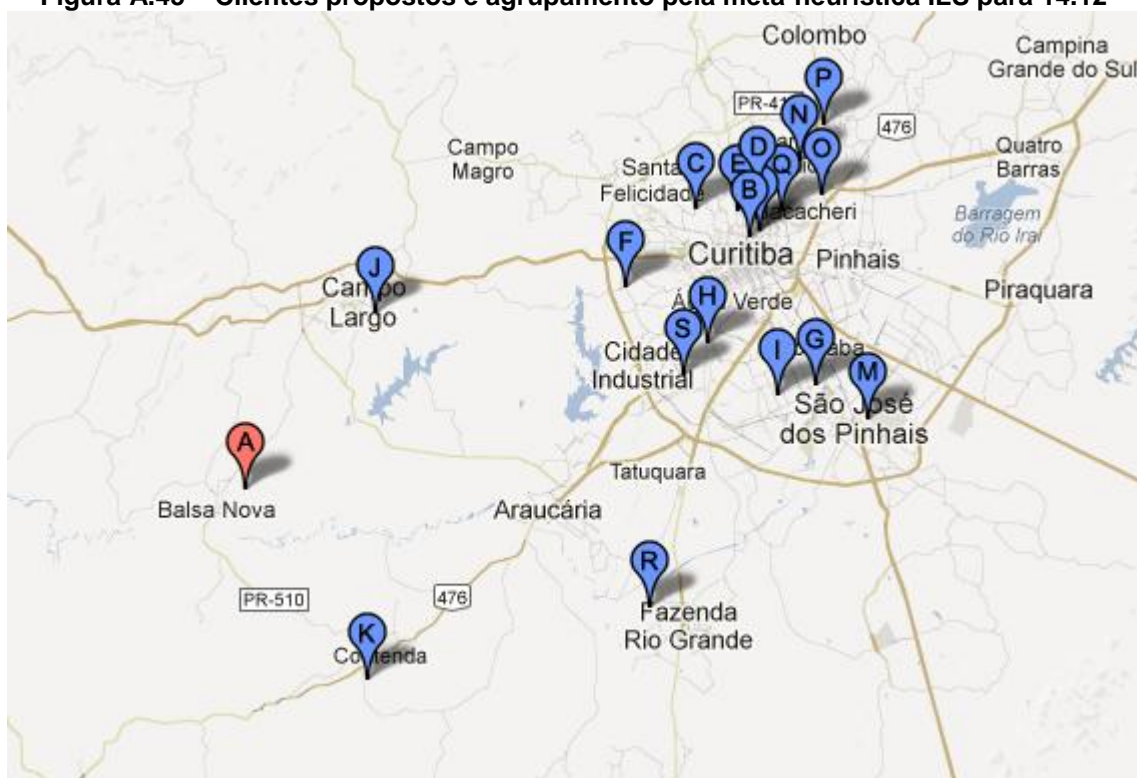
Figura A.41 – Clientes atuais e agrupamento atual para 14.12

Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.42 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 14.12

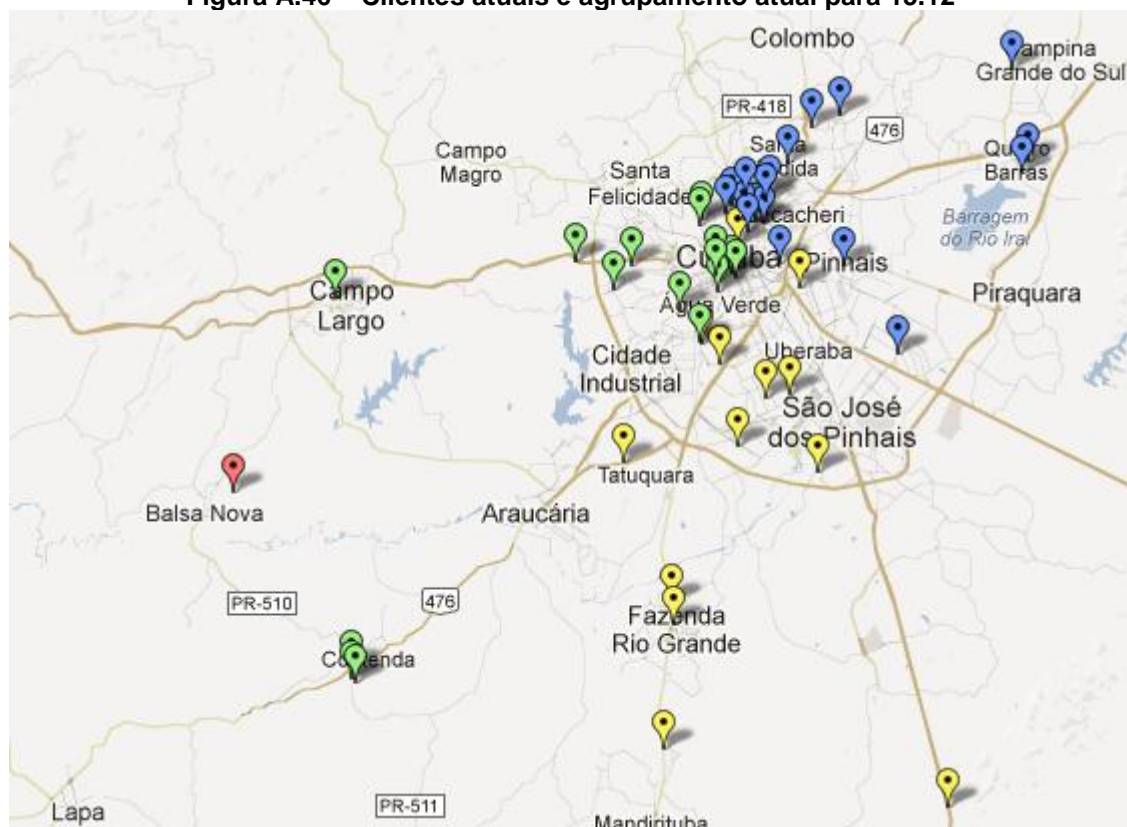
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.45 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 14.12



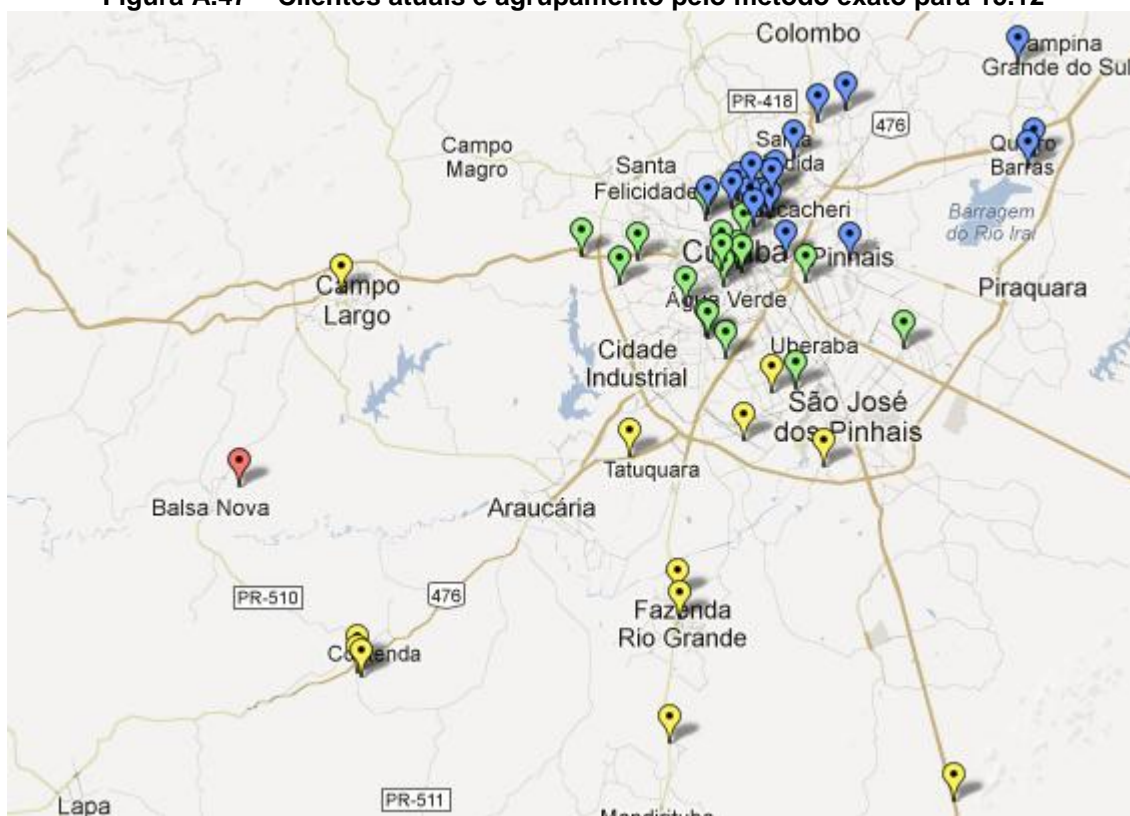
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.46 – Clientes atuais e agrupamento atual para 15.12



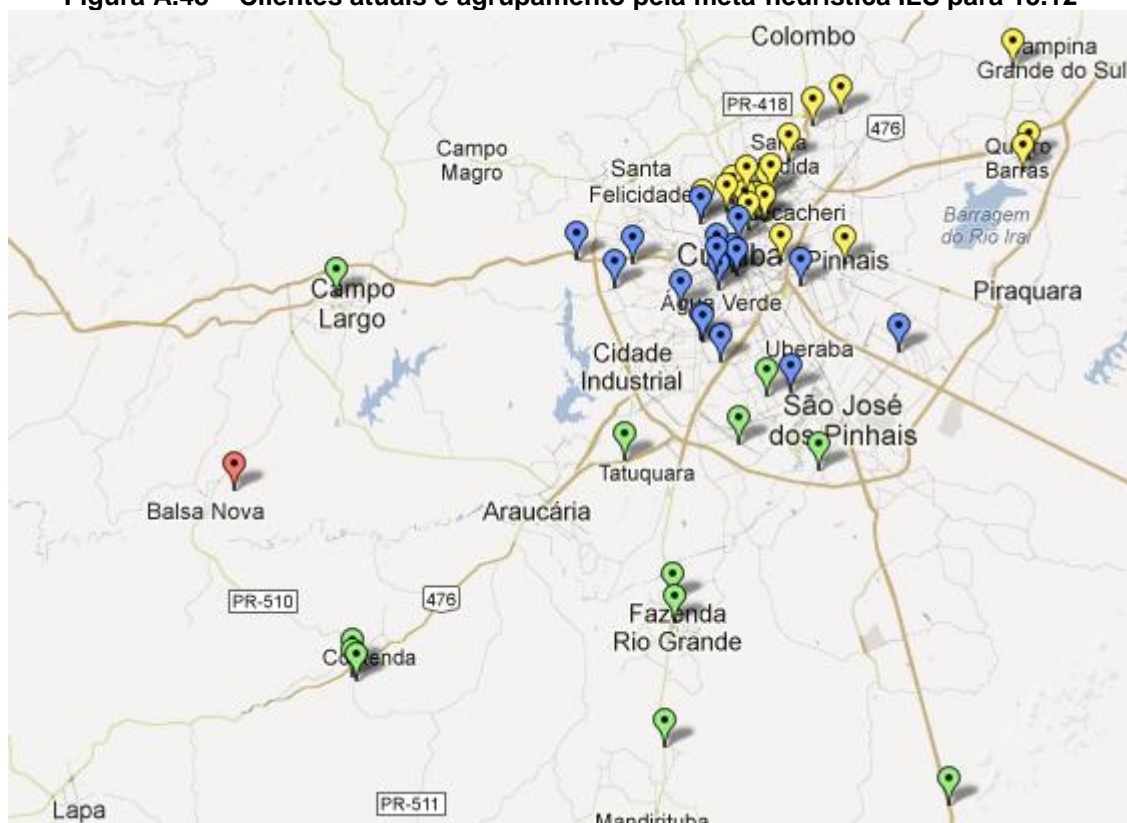
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.47 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 15.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.48 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 15.12



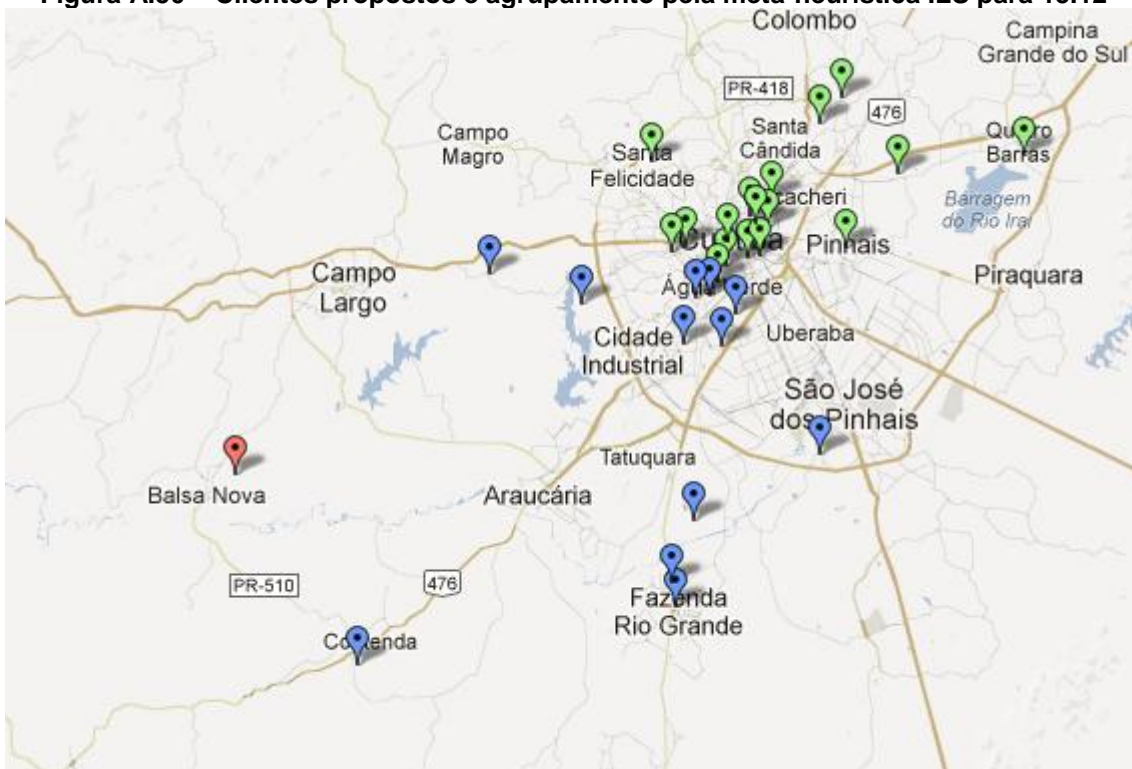
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.49 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 15.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.50 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 15.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.51 – Clientes atuais e agrupamento atual para 16.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.52 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 16.12



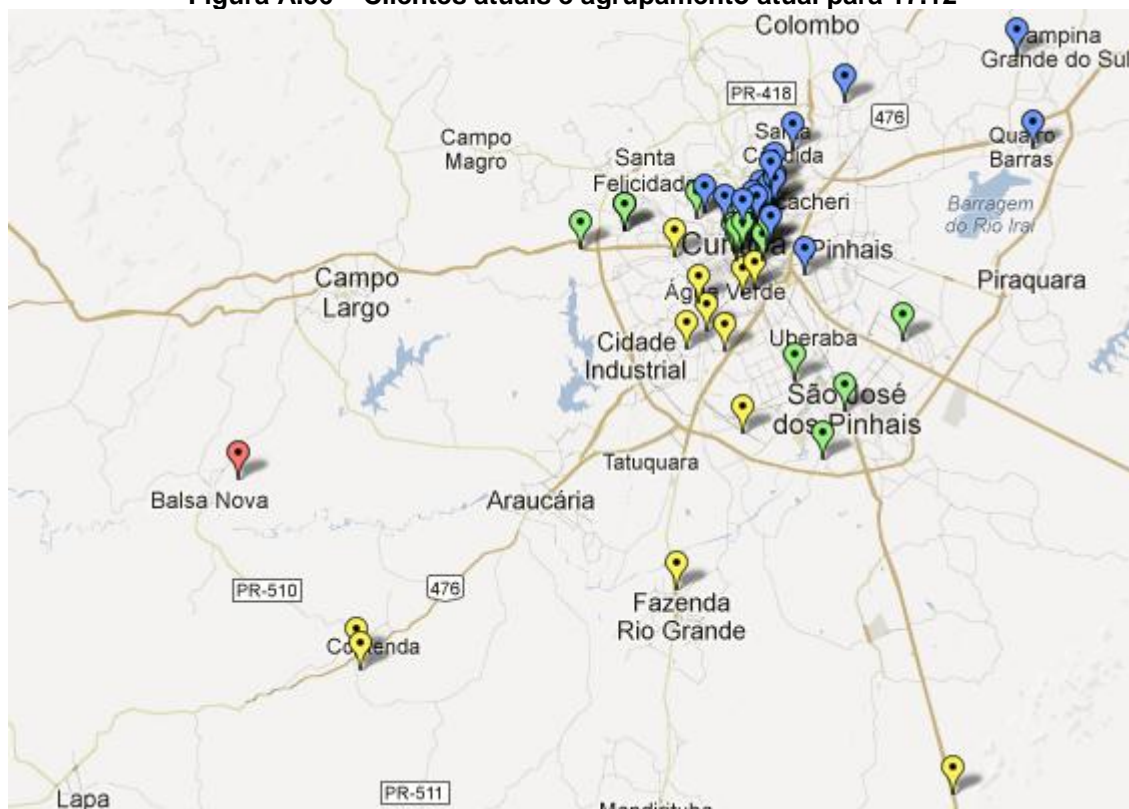
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.55 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 16.12



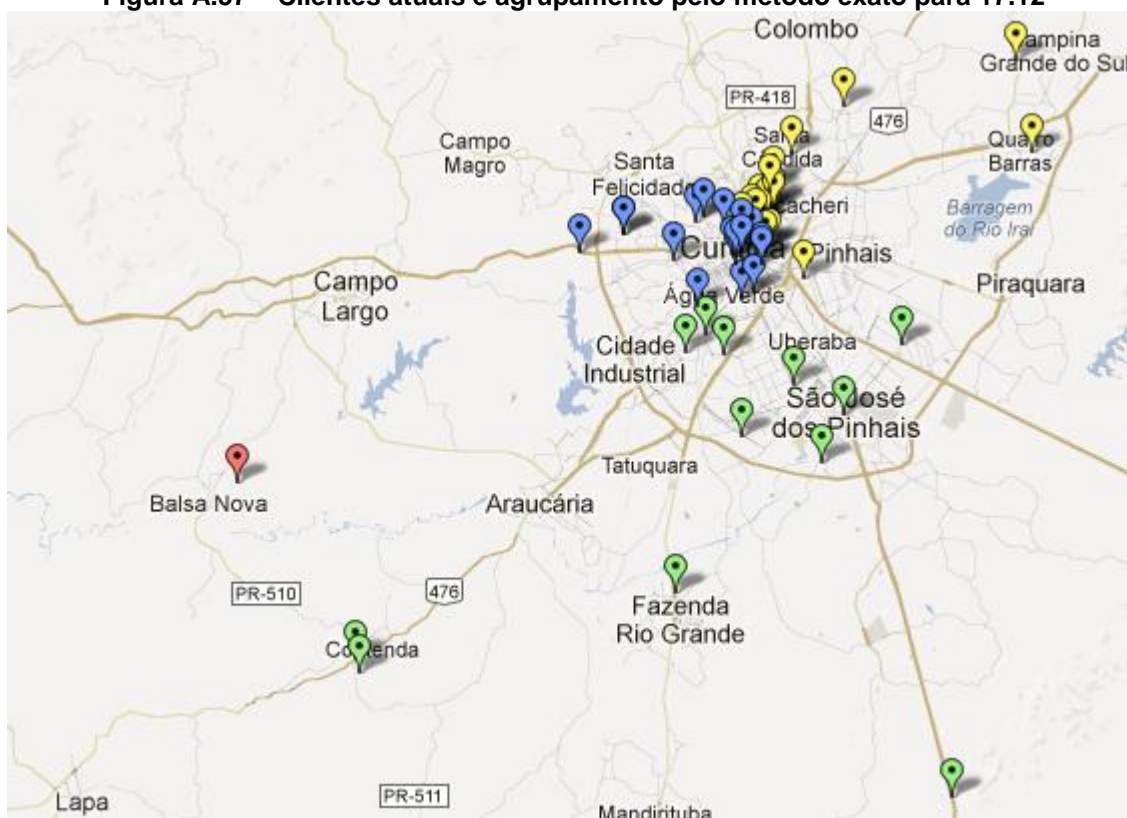
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.56 – Clientes atuais e agrupamento atual para 17.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.57 – Clientes atuais e agrupamento pelo método exato para 17.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.58 – Clientes atuais e agrupamento pela meta-heurística ILS para 17.12



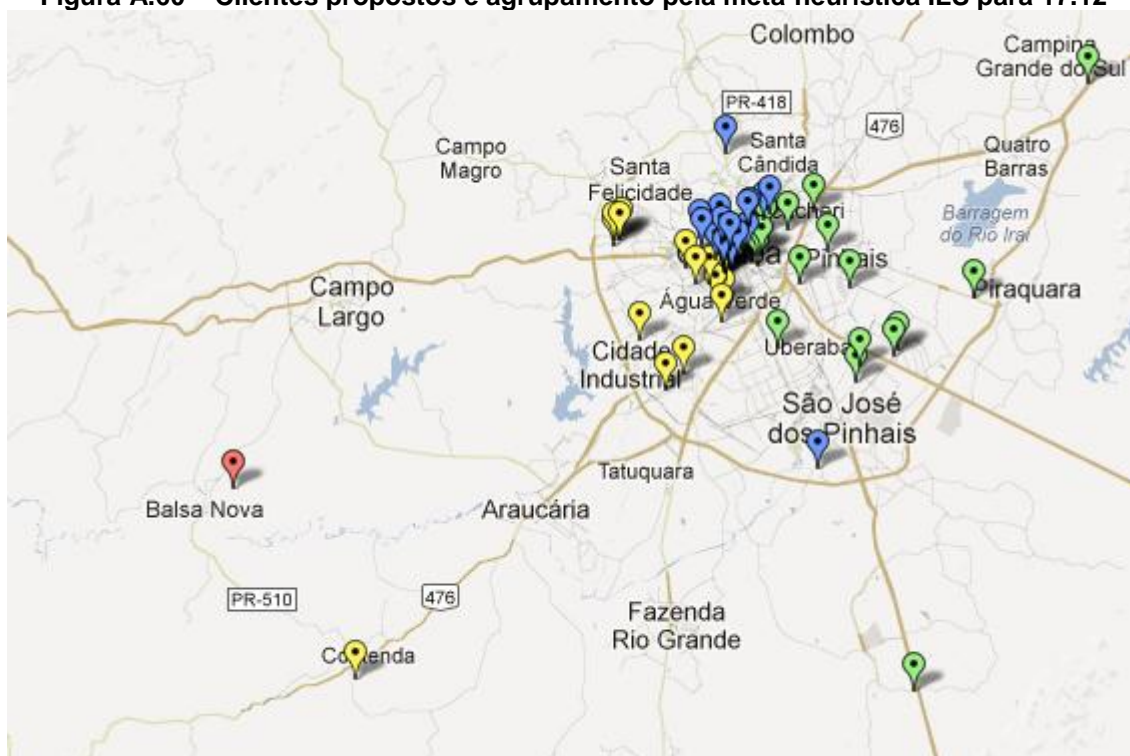
Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.59 – Clientes propostos e agrupamento pelo método exato para 17.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).

Figura A.60 – Clientes propostos e agrupamento pela meta-heurística ILS para 17.12



Fonte: Elaborado pela autora utilizando <http://batchgeo.com> (2013).