UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Sílvia Maria Santana Mapa

LOCALIZAÇÃO-ALOCAÇÃO DE INSTALAÇÕES COM SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E MODELAGEM MATEMÁTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para a obtenção do título de *Mestre em Ciências em Engenharia de Produção*.

Área de Concentração: Produção e Tecnologia

Orientador:

Prof. Dr. Renato da Silva Lima

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá – Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

M3201

Mapa, Sílvia Maria Santana

Localização-alocação de instalações com sistema de informa_ mações geográficas e modelagem matemática / Sílvia Maria Santana Mapa. -- Itajubá,(MG): UNIFEI, 2007.

142 p.: il.

Orientador: Prof. Dr. Renato da Silva Lima. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

Localização-alocação de instalações.
 Sistema de infor_mações geográficas.
 Programação linear inteira mista.
 Lima, Renato da Silva, orient.
 Universidade Federal de Itajubá.
 Título.

CDU 658.112(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Sílvia Maria Santana Mapa

LOCALIZAÇÃO-ALOCAÇÃO DE INSTALAÇÕES COM SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E MODELAGEM MATEMÁTICA

Dissertação aprovada por banca examinadora em 02 de Abril de 2007.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Renato da Silva Lima – UNIFEI

Prof. Dr. José Arnaldo Barra Montevechi – UNIFEI

Prof. Dr. Rui António Rodrigues Ramos – UMINHO

Itajubá 2007

DEDICATÓRIA

Dedico esta conquista aos meus pais, Luiz e Sônia, pela confiança depositado à minha formação, aos meus queridos irmãos, Michelle e Danilo, pelo imenso carinho, e ao meu noivo Albano, pela força e amor demonstrado, sobretudo nos momentos de minha ausência.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, só tenho a agradecer a Deus, engenheiro do universo, e aos meus pais, que sempre sonharam junto comigo e me apoiaram incondicionalmente.

Ao professor orientador Renato da Silva Lima, por ter ditado os rumos e o ritmo necessário para a consecução desta pesquisa. Ao professor José Arnaldo Barra Montevechi, pelas avaliações e sugestões fornecidas.

Aos meus verdadeiros amigos da República MR, com os quais dividi a maior parte dos meus dias de mestranda. Foram vocês os responsáveis pelos melhores momentos vividos em Itajubá.

Ao Leandro Enomoto, pelo fornecimento de alguns dados, fundamentais para execução deste trabalho, e aos meus colegas da sala do laboratório, pelo ambiente descontraído e divertido proporcionado, em especial à Sandra.

A todos os professores e funcionários da UNIFEI que, quando precisei, me atenderam prontamente com um sorriso no rosto.

À CAPES, pela oportunidade oferecida com a concessão da bolsa de mestrado.

"O homem se torna muitas vezes o que ele próprio acredita que é. Se eu insisto em repetir para mim mesmo que não sou capaz de realizar alguma coisa, é possível que realmente seja incapaz de fazê-la. Ao contrário, se tenho a convicção de que posso fazê-la, certamente adquirirei capacidade de realizá-la, mesmo que não a tenha no começo".

(Gandhi)

"O poema, ao ser feito, deve mudar alguma coisa, nem que seja apenas o próprio poeta. Se, ao poeta, depois de fazer o poema, resta o mesmo que antes, o poema não terá sentido".

(Ferreira Gullar)

"Só devemos escrever acerca daquilo que gostamos".

(Ernest Renan)

RESUMO

Problemas de localização-alocação de instalações envolvem escolher o melhor local para uma ou mais facilidades, dentro de um conjunto de locais possíveis, a fim de se minimizar os custos de transporte, e estando sujeito à restrição de limite máximo de capacidade. É um problema complexo por envolver, na maioria das vezes, um grande número de variáveis e grandes volumes de dados. Uma valiosa ferramenta para a resolução desses problemas são os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), pela sua grande capacidade em armazenar, exibir e manipular dados espacialmente distribuídos e gerar resultados gráficos.

Dentre os diversos *softwares* SIG disponíveis no mercado, alguns se caracterizam por já possuírem incorporados rotinas para aplicações em transportes e logística. Neste trabalho, optou-se pelo uso do *software* TransCAD®, versão 4.5, que possui, dentre suas rotinas, uma para a localização de facilidades. No entanto, a localização de facilidades e posterior alocação da demanda conforme a capacidade máxima é feita de forma indireta, utilizando duas rotinas, uma em seqüência da outra: a primeira, denominada Localização de Facilidades, na qual inclui a possibilidade de abertura de novas instalações ou fechamento das já existentes, porém não estabelece a restrição de capacidade máxima; e a rotina Problema do Transporte, que realoca as demandas conforme as restrições de capacidade, permitindo sua fragmentação, porém não permite mais a abertura ou fechamento destas unidades, estando condicionada à configuração anterior de número e locais de instalações.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a qualidade das soluções para o problema de localização-alocação de instalações geradas pelo SIG TransCAD, obtidas após a utilização combinada de suas duas rotinas, Localização de Facilidades e Problema do Transporte, quando comparadas com as supostas soluções ótimas, obtidas a partir do modelo matemático desenvolvido externamente ao SIG, baseado em Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Na metodologia de pesquisa do trabalho, classificada como modelagem e simulação, os modelos SIG e PLIM foram aplicados a três simulações, de diferentes níveis de complexidade. A primeira propõe a abertura de fábricas e alocação de clientes, compreendendo o estado de São Paulo e 18 de seus principais municípios. A segunda envolve um atacadista, na qual se fará o estudo de localização para centros de distribuição e alocação de seus clientes varejistas. Na terceira, o objetivo será o de localizar Creches em um contexto urbano e conseqüente alocação da demanda (crianças de 0 a 3 anos).

Como resultados gerais do trabalho, pode-se afirmar que o SIG possui um ótimo desempenho quando se trata apenas da questão da localização das instalações, no que tange ao modelo sem restrição de capacidade, com suas soluções coincidindo em todas as simulações efetuadas com a solução ótima do modelo PLIM. No entanto, ao se considerar a restrição de capacidade e conseqüente alocação da demanda, as soluções do SIG são claramente afetadas pela resolução em separado das rotinas de localização e alocação, resultando em soluções de localizações e respectivas alocações diferentes entre os modelos SIG e PLIM. Por outro lado, o SIG demonstrou um ótimo desempenho em tratar problemas de maior porte e, além disso, presta um grande auxílio nas fases de obtenção de dados e visualização gráfica das soluções, inclusive na interação com o modelo PLIM.

Palavras-chave: Localização-Alocação de Instalações; Sistema de Informações Geográficas; Programação Linear Inteira Mista.

ABSTRACT

Location-allocation problems involve choosing for the best site for one or more facilities – among a set of possible sites – in order to minimize the costs of transportation, and to reduce the maximum capacity limits of those facilities. Location problems are complex, once they involve mostly a great number of variables, and great data volume. A valuable tool to solve these problems are the Geographic Information Systems (GIS) for its notable capacity to store, show, and manipulate geographically distributed data, and also generating graphical results.

Among the several GIS softwares available in the market, some are characterized for carrying logistics and transportation application routines. For this work, the TransCAD®, version 4.5 has been chosen, for having a specific routine for locating facilities, among others. Nevertheless, the facilities location and subsequent demand allocation, according to the maximum capacity are indirectly done, by using two different routines, one after the other: the first one is named Facilities Location, which includes the possibility either for opening new installations, or closing previous ones, however, it does not provide maximum capacity limits restrictions. The second one is the Transportation Problem routine, which reallocates the demands according to the capacity restrictions, yields its fragmentation, but it does not longer allow opening or closing facilities, and is conditioned to a previous configuration of number and sites of installations.

Therefore, the aim of this work is to evaluate the quality of the solutions for location-allocation problems, generated by the GIS, obtained by combining the use of both routines – Facilities Location and Transportation Problems – when compared with the assumed optimal solutions, obtained from the mathematical model developed externally to the GIS, based on the Mixed Integer Linear Programming (MILP). On the research methodology, classified as modeling and simulation, the GIS and MILP models have been applied to three simulations in different levels of complexity. The first one proposes factories openings and customers' allocation in the state of São Paulo, in eighteen of the main municipalities in the state. The second one involves a wholesaler, of which a study will be carried out in order to locate distribution centers and allocation of retail customers. In the third one, the aim is to locate urban crèches – for 0 to 3-year-old children – and subsequent demand allocation.

As a conclusion, the GIS model owns an optimum performance to be applied to facilities location, in relation to the non-restrictive capacity limit model, and also all its solutions agree with the MILP optimum solution simulations. However, considering the capacity limits and consecutive demand allocation, the GIS model solutions are clearly affected by location-allocation routines in separate, which causes diverse solutions for locations and allocations at a time to be chosen among the GIS and MILP models. On the other hand, the GIS model has shown an optimum performance in dealing with major problems. Besides, it serves as an important tool for data collecting and solutions graphic visualization, including the MILP model interaction.

Key-words: Location-Allocation Problem, Geographic Information System, Mixed Integer Linear Programming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Visão geral do trabalho	7
Figura 3.1 – Componentes de um SIG	37
Figura 3.2 – Integração de camadas em SIG	
Figura 3.3 – Representação de dados nos formatos vetorial e matricial	
Figura 3.4 – Posicionamento do SIG no processo de planejamento	45
Figura 3.5 – Modelo hierárquico dos grupos funcionais em SIG-T	
Figura 4.1 – Problema de localização-alocação no modelo SIG	
Figura 5.1 – Etapas do modelo PLÍM	
Figura 5.2 – Elos considerados na formulação do modelo PLIM	
Figura 5.3 – Fases da metodologia de pesquisa	
Figura 5.4 – Etapas da metodologia de pesquisa	77
Figura 5.5 – Principais elementos da cadeia logística	78
Figura 5.6 – Classificação da pesquisa científica	
Figura 6.1 – Representação da região para Simulação I	
Figura 6.2 – Soluções geradas pela rotina Localização de Facilidades	
Figura 6.3 – Soluções geradas pelo modelo PLIM para os Cenários 3 e 4	91
Figura 6.4 – Características do problema da Simulação II	98
Figura 6.5 – Solução gerada pela rotina Localização de Facilidades para o Cenário 2	101
Figura 6.6 – Solução gerada pela rotina Localização de Facilidades para o Cenário 3	101
Figura 6.7 – Solução gerada pela rotina Localização de Facilidades para o Cenário 4	102
Figura 6.8 - Comparação entre as soluções do Cenário 2 para os modelos SIG e PLIM	107
Figura 6.9 - Comparação entre as soluções do Cenário 3 para os modelos SIG e PLIM	108
Figura 6.10 – Distribuição real das creches e respectivos alunos	111
Figura 6.11 – Conjunto de candidatos à localização para Simulação III	114
Figura 6.12 - Solução gerada pela rotina Localização de Facilidades para o Cenário 1	117
Figura 6.13 - Solução gerada pela rotina Localização de Facilidades para o Cenário 2	117
Figura 6.14 - Solução gerada pela rotina Localização de Facilidades para o Cenário 3	118
Figura 6.15 - Solução gerada pela rotina Localização de Facilidades para o Cenário 4	118
Figura 6.16 – Comparação entre as soluções do Cenário 4 para os modelos SIG e PLIM.	123

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Classificação de problemas de localização	18
Quadro 2.2 – Metaheurísticas a serem aplicadas a problemas de localização	28
Quadro 3.1 – Principais características de softwares de localização	50
Quadro 5.1 – Limite máximo de variáveis e restrições suportado por cada software	70
Quadro 6.1 – Características dos municípios-clientes da Simulação I	84
Quadro 6.2 – Definição dos cenários da Simulação I	86
Quadro 6.3 – Valores de demanda dos municípios-clientes	97
Quadro 6.4 – Definição dos cenários da Simulação II	100
Quadro 6.5 – Identificação dos municípios-clientes	100
Quadro 6.6 – Definição dos cenários da Simulação III	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 – Soluções geradas no modelo SIG para Simulação I	87
Tabela 6.2 – Soluções geradas no modelo PLIM para Simulação I	90
Tabela 6.3 – Comparação das soluções dos modelos SIG e PLIM para Simulação I	93
Tabela 6.4 – Soluções geradas no modelo SIG para Simulação II	102
Tabela 6.5 – Soluções geradas no modelo PLIM para Simulação II	105
Tabela 6.6 – Comparação das soluções dos modelos SIG e PLIM para Simulação II	106
Tabela 6.7 – Resultados para os Cenários 1 e 2 do modelo SIG	115
Tabela 6.8 – Resultados para os Cenários 3 e 4 do modelo SIG	115
Tabela 6.9 – Tempos consumidos pelo modelo PLIM nos diferentes cenários	119
Tabela 6.10 – Resultados para os Cenários 1 e 2 do modelo PLIM	120
Tabela 6.11 – Resultados para os Cenários 3 e 4 do modelo PLIM	120
Tabela 6.12 – Variação entre as soluções obtidas pelos modelos SIG e PLIM	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPES Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CCAE Centro de Cartografia Automatizada do Exército

CD Centro de Distribuição

CRC Com Restrição de Capacidade

GA Genetic Algorithms

GIS Geographical Information Systems

GPS Global Positioning System

GRASP Greedy Randomized Adaptive Search Procedure

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LF Localização de Facilidades

PLIM Programação Linear Inteira Mista

PT Problema do Transporte

SA Simulated Annealing

SAD Sistema de Apoio à Decisão

SADE Sistema de Apoio à Decisão Espacial SIG Sistemas de Informações Geográficas

SIG-T Sistemas de Informações Geográficas com aplicações em Transportes

SKU Stock Keeping Unit

SQL Structured Query LanguageSRC Sem Restrição de Capacidade

TS Tabu Search

VNS Variable Neighborhood Search

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo geral	6
	Objetivos específicos	
1.3	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO	8
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2	PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO-ALOCAÇÃO DE INSTALAÇÕES	10
2.1	IMPORTÂNCIA DOS ESTUDOS DE LOCALIZAÇÃO	12
2.2	CLASSIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO	14
	CUSTOS PRESENTES EM MODELOS DE LOCALIZAÇÃO-ALOCAÇÃO	
2.4	MÉTODOS DE SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO-ALOCAÇÃO	
	2.4.1 Programação Exata	
	2.4.2 Programação Heurística	
2.5	APLICAÇÕES PRÁTICAS EM ESTUDOS DE LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES	
3	SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	
	COMPONENTES DE UM SIG	
	REPRESENTAÇÃO DE DADOS EM MAPAS	
	O SIG COMO UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO ESPACIAL	
	SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS COM APLICAÇÕES EM TRANSPORTES (SIG-T)	
	INTEGRAÇÃO DE MODELOS DE LOCALIZAÇÃO EM SIG	
4	LOCALIZAÇÃO-ALOCAÇÃO DE INSTALAÇÕES NO SIG TRANSCAD	
	Criação da Matriz de Distâncias	
	LOCALIZAÇÃO DE FACILIDADES	
4.3	PROBLEMA DO TRANSPORTE	67
5	METODOLOGIA DE PESQUISA	69
5.1	PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO-ALOCAÇÃO DE INSTALAÇÕES NO MODELO PLIM	
	5.1.1 Descrição do modelo PLIM	
	ETAPAS DA METODOLOGIA DE PESQUISA	
5.3	CLASSIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE PESQUISA	
6	MODELAGENS E SIMULAÇÕES	81
6.1	SIMULAÇÃO I: LOCALIZAÇÃO E ALOCAÇÃO ENTRE FÁBRICAS E CLIENTES	81
	6.1.1 Problema de localização-alocação no modelo SIG	
	6.1.2 Problema de localização-alocação no modelo PLIM	
	6.1.3 Comparação dos resultados gerados entre os dois modelos	
6.2	SIMULAÇÃO II: LOCALIZAÇÃO E ALOCAÇÃO ENTRE CENTROS DE DISTRIBUIÇÃO E CLIENTES	
	6.2.1 Definição de parâmetros e variáveis do modelo	
	6.2.3 Problema de localização-alocação no modelo PLIM	
	6.2.4 Comparação dos resultados gerados entre os dois modelos	
63	SIMULAÇÃO III: LOCALIZAÇÃO E ALOCAÇÃO ENTRE CRECHES E ALUNOS	
0.5	6.3.1 Obtenção dos dados necessários ao modelo	
	6.3.2 Problema de localização-alocação no modelo SIG	
	6.3.3 Problema de localização-alocação no modelo PLIM	
	6.3.4 Comparação dos resultados gerados entre os dois modelos	
6.4	Análise geral dos resultados	123
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	128
7.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	131
RE	FERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132
AN	EXO A - RELAÇÃO DOS MUNICÍPIOS CONSIDERADOS PARA A SIMULAÇÃO II	136

1 Introdução

A logística tem se tornado cada vez mais importante dentro da atual conjuntura econômica e de desenvolvimento tecnológico mundial, e hoje é considerada um elemento-chave na estratégia competitiva de empresas públicas e privadas. A missão da logística, segundo Ballou (2006), é dispor a mercadoria ou o serviço solicitado no local e no momento oportunos, na quantidade exata e nas condições desejadas, de forma eficiente ao cliente e, ao mesmo tempo, fornecendo a maior contribuição possível à empresa. Somente assim o produto ou serviço terá valor para o cliente, sendo a eficiência na gestão logística a principal responsável para a obtenção de tal objetivo. Para alcançar esta eficiência, faz-se necessário um planejamento de toda a rede logística.

Segundo Bowersox e Closs (2001), o trabalho da logística pode ser estruturado em cinco áreas funcionais, a saber: (1) projeto de rede; (2) informação; (3) transporte; (4) estoque; e (5) armazenagem, manuseio de materiais e embalagem. O desafio está em gerenciar o trabalho relacionado a estas áreas funcionais de maneira sincronizada, com o objetivo de gerar a capacidade necessária ao atendimento das exigências logísticas. No que tange ao projeto de rede, foco do presente trabalho, o objetivo é determinar a quantidade necessária de cada tipo de instalação (fábricas, armazéns, instalações de *cross docking*, lojas de varejo), e sua localização geográfica, assim como vincular os pedidos de clientes aos locais de onde deve ser feita a expedição, ou seja, proceder à alocação entre oferta e demanda. A rede de instalações forma uma estrutura a partir da qual as operações logísticas são executadas. Assim, a rede incorpora as decisões em todas as outras áreas (informação, transporte, estoque, armazenagem e manuseio de materiais), aumentando ainda mais a sua importância.

À medida que o processo de internacionalização do comércio avançou, cresceu na mesma proporção o papel das empresas de logística, que agora ocupam lugar no centro dos debates sobre gestão empresarial. A globalização encurtou as distâncias, principalmente com o advento da *Internet*, impondo um ritmo feroz ao comércio mundial, no qual empresas de entrega rápida são as grandes vencedoras. Logística é, modernamente, o conjunto de recursos e operações feitas para permitir o transporte de pessoas ou mercadorias com o menor custo e ao menor tempo possíveis.

Quando uma empresa tem operações logísticas globalizadas, questões relacionadas ao projeto de rede tornam-se cada vez mais complexas. A seleção de uma melhor rede em termos de localização pode significar o primeiro passo para a obtenção de vantagem competitiva. Conforme Bowersox e Closs (2001), a globalização de fontes de suprimento e de considerações de *marketing* aumentou substancialmente a importância de estudos de localização de instalações, que passa a constituir uma questão logística de ampla abrangência e de grande importância, em termos estratégicos e táticos, para a maior parte das organizações.

Planejar estrategicamente consiste em gerar condições para que as empresas possam decidir rapidamente perante oportunidades e ameaças, de maneira a criar vantagens competitivas em relação à concorrência, aproveitando-se ao máximo de todas as oportunidades que lhe geram ganhos, garantindo assim sua perpetuação no tempo. As empresas possuem diferentes critérios de desempenho para avaliar suas estratégias organizacionais. Os principais critérios utilizados são: custo, qualidade, desempenho de entrega, flexibilidade e, mais recentemente, também os critérios de inovatividade e não-agressão ao meio ambiente. Estes critérios podem ser ainda definidos dentro da ótica de qualificadores e ganhadores de pedidos. Os qualificadores são aqueles que qualificam a empresa a participar do mercado que se pretende atingir. Já os critérios ganhadores de pedidos são aqueles que definirão a escolha do cliente pela empresa, uma vez que a mesma já esteja qualificada. Neste sentido, sempre que atingido certo nível mínimo exigido pelo mercado nos critérios qualificadores, a empresa deve trabalhar na busca pela excelência dos critérios ganhadores de pedidos (TUBINO, 1999).

Dentro da nova ótica dos mercados globalizados, segundo Tubino (1999), os critérios custo e qualidade são requisitos mínimos para que as empresas participem desse mercado, sendo, portanto, qualificadores. Já os critérios desempenho de entrega e flexibilidade são ganhadores de pedidos, devendo ser, portanto, mais valorizados na definição de uma estratégia competitiva. Quando se tem uma boa estratégia de localização de instalações e distribuição na cadeia logística, garante-se simultaneamente uma maior facilidade para atingir um alto nível de eficiência no critério desempenho de entrega, proporcionando à empresa uma posição de destaque perante o olhar do cliente.

Apesar de dito problema de localização, as decisões neste campo envolvem não somente a determinação de um local apropriado, mas também do número de instalações, das capacidades máximas de operação e alocações de demanda entre as instalações e seus

respectivos clientes. Dito isso, o problema de localização aqui referido será doravante denominado problema de localização-alocação de instalações em uma rede logística.

De forma geral, o problema de localização-alocação envolve a escolha dos melhores locais para múltiplas instalações, dentro de um conjunto de locais possíveis, definidos em uma rede logística. Estas instalações, do ponto de vista da modelagem, são nós de uma rede, onde ocorrem as operações logísticas. Redes são estruturas compostas por nós e arcos (ou *links*), que unem esses nós, aos quais serão alocados fluxos de transporte. O objetivo do problema de localização-alocação é encontrar a melhor solução, que minimize os custos logísticos, dentro dos seguintes termos:

- Definir a quantidade de instalações, sendo este um parâmetro de entrada do problema, e não uma variável endógena a ser calculada pelo modelo;
- Definir as melhores localizações das instalações;
- Definir as alocações, ou seja, a porcentagem de demanda de cada cliente suprida por cada centro de oferta, de forma que a demanda total dos clientes seja completamente atendida pelas facilidades em operação;
- Restringir a capacidade física de cada instalação dentro de limites máximos de operação, previamente estabelecidos.

Problemas de localização-alocação de instalações, em sua grande parte, são problemas complexos, por envolverem um grande número de variáveis e grandes volumes de dados. Segundo Bowersox e Closs (2001), avanços significativos da tecnologia de computação, o aumento das incertezas relativas à economia, às fontes de suprimento de materiais, à concorrência no mercado, e ainda a crescente complexidade da tomada de decisões, estimularam o interesse em instrumentos computacionais para melhorar a eficácia das decisões logísticas, em particular as decisões de localização de instalações.

Conforme Fleury *et al.* (2000), desde a década de 70 já estavam desenvolvidas as bases para aplicações computacionais de estudos de localização de instalações. Todavia, os problemas de dimensões práticas, de larga escala, estavam basicamente restritos à comunidade acadêmica ou aos órgãos governamentais, pela utilização de computadores *mainframes*. Foi recentemente, depois da ampla utilização de computadores pessoais, dotados de processadores de alta velocidade, que se expandiu o uso comercial de ferramentas computacionais aplicadas a problemas de localização. À medida que a complexidade do

problema aumenta, os estudos de localização necessitam de novas tecnologias de informação, que permitem tratar os sistemas logísticos de forma efetivamente integrada (LACERDA, 1999).

A abordagem de modelos de localização de facilidades tem sido proposta, atualmente, por meio de ferramentas de auxílio à decisão espacial, principalmente quando uma base de dados geograficamente referenciada se encontra disponível. Neste caso, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são de vital importância na coleta e análise desses dados, pois integram uma sofisticada interface gráfica a uma base de dados geograficamente referenciada, constituindo-se em poderosas ferramentas de análise e planejamento espacial (LIMA, 2003).

Os Sistemas de Informações Geográficas aplicados ao Transporte (SIG-T) são uma derivação dos SIG, aplicados na área de planejamento e operação de transportes. Dentre suas diversas funcionalidades, possuem módulos dedicados à localização de facilidades e ao planejamento do transporte. Os SIG-T auxiliam na resolução dos problemas de localização por terem ferramentas específicas para tal e também pela sua grande capacidade em armazenar, exibir e manipular dados espacialmente distribuídos. Nada mais natural, então, do que se utilizar as ferramentas de um SIG-T¹ para estudar as melhores localizações de instalações (centros de produção, centros de distribuição, escolas ou creches, por exemplo) e melhores distribuições dos clientes a estas unidades, buscando reduzir os custos de deslocamento ou transporte.

A partir de experiências anteriores efetuadas nos módulos do SIG TransCAD aplicados ao problema de localização-alocação de instalações, constatou-se que o SIG resolve o problema, porém de forma indireta, em duas etapas distintas. A primeira engloba a rotina *Facility Location (*doravante denominada Localização de Facilidades). Esta rotina do SIG identifica as melhores localizações para as instalações, propondo a abertura de novas unidades ou o fechando das já existentes, e procede a alocação entre demanda e oferta, porém sem levar em consideração a capacidade máxima de operação das instalações. Além disto, esta rotina aloca a demanda total de cada cliente a uma determinada facilidade, não sendo capaz de fragmentar as demandas, ou seja, faz com que cada cliente seja atendido por uma única facilidade. A rotina baseia-se na suposição de que, se determinada solução gera o menor custo para se transportar uma unidade de produto ou serviço, será também a melhor solução para os

_

¹ Para fins de simplificação de redação, embora tenha sido utilizado um SIG-T, ao longo desta pesquisa o mesmo será referenciado apenas como SIG, ficando claro que é um sistema que possui aplicações em planejamento de transportes.

demais itens, sem se preocupar com um limite de capacidade máxima de operação da facilidade.

Para impor esta restrição de limite de capacidade, faz-se necessário, no SIG em questão, submeter a solução da rotina Localização de Facilidades à rotina *Transportation Problem*, (doravante denominada Problema do Transporte), caracterizando a segunda etapa de solução do problema no SIG. Sendo assim, a solução da rotina Localização de Facilidades se torna a entrada da rotina Problema do Transporte, que irá realocar a demanda à oferta segundo o critério de limite máximo de capacidade das instalações, permitindo a fragmentação das demandas. Quando a capacidade máxima de uma facilidade é atingida, a rotina aloca a porção restante da demanda do cliente para a facilidade mais próxima. Porém, esta segunda rotina não mais admite a abertura ou fechamento das instalações previamente geradas na rotina Localização de Facilidades, ficando pré-condicionada àquela configuração inicial, fator que claramente pode comprometer a qualidade da solução final, visto que a escolha de abertura/fechamento de novas instalações é certamente condicionada às capacidades dessas instalações.

Adicionalmente, há de se considerar que ambas as rotinas trabalham com algoritmos heurísticos na busca das soluções. Conseqüentemente, não se garante que a solução encontrada após a utilização das rotinas seja a solução matemática ótima, o que só se saberia ao certo com a resolução do problema via algoritmo otimizante. Esse é o ponto de partida para o presente trabalho, cujo objetivo é avaliar a qualidade das soluções para o problema de localização-alocação de instalações geradas pelo SIG TransCAD, obtidas após a utilização combinada de suas duas rotinas (Localização de Facilidades e Problema do Transporte), quando comparadas com as supostas soluções ótimas, obtidas a partir de um modelo matemático a ser desenvolvido externamente ao SIG.

Este modelo será formulado segundo a técnica da Pesquisa Operacional denominada Programação Linear Inteira Mista (PLIM), uma técnica exata que irá efetuar uma busca exaustiva em torno da melhor solução matemática do problema de localização-alocação. O modelo externo PLIM realiza a localização e alocação de um dado número de instalações aos seus clientes, obedecendo aos limites de capacidade máxima destas instalações e permitindo a fragmentação das demandas, tudo de forma simultânea, ao contrário do uso das rotinas do SIG. Adicionalmente, pretende-se explorar a interação entre o modelo externo PLIM e o modelo SIG, que se dará, em um primeiro momento, durante a entrada de dados, devido à grande potencialidade do SIG em armazenar e manipular dados geograficamente distribuídos.

Em um segundo momento, após o modelo matemático PLIM gerar a solução do problema, esta será transportada para o SIG, que então irá gerar a visualização gráfica da solução, outra grande vantagem de *softwares* SIG.

Na metodologia de pesquisa do trabalho, classificada como modelagem e simulação, tanto o modelo SIG quanto o modelo PLIM serão aplicados em três simulações distintas para resolução do problema de localização-alocação de instalações. A primeira propõe a abertura de fábricas e alocação de clientes, compreendendo o estado de São Paulo e 18 de seus principais municípios. A segunda envolve um atacadista, na qual se fará o estudo de localização para centros de distribuição e alocação de seus clientes varejistas. Na terceira, o objetivo será o de localizar Creches em um contexto urbano e conseqüente alocação da demanda (crianças de 0 a 3 anos). Estas três aplicações serão propostas no intuito se obter problemas de localização-alocação de instalações de diferentes graus de complexidade, enquadrados nos níveis de pequeno, médio e grande porte, abrangendo situações nos setores público e privado.

Depois de efetuadas as simulações propostas, as soluções geradas pelos modelos SIG e PLIM serão comparadas e analisadas. Espera-se que os resultados finais deste trabalho elucidem os pontos fortes e eventuais falhas do *software* SIG, aplicados ao problema de localização de facilidades e alocação entre centros de demanda e oferta. A Figura 1.1 apresenta uma visão geral do trabalho.

1.1 Objetivo geral

• Avaliar a qualidade das soluções para o problema de localização-alocação de instalações geradas pelo SIG TransCAD, obtidas após a utilização combinada de suas duas rotinas, Localização de Facilidades e Problema do Transporte, quando comparadas com as supostas soluções ótimas, obtidas a partir do modelo matemático a ser desenvolvido externamente ao SIG.

1.2 Objetivos específicos

• Avaliar a qualidade das soluções heurísticas geradas pelo SIG TransCAD, por meio da comparação das soluções obtidas via algoritmo otimizante;

- Avaliar a qualidade das soluções geradas pela combinação das rotinas Localização de Facilidades e Problema do Transporte, quando comparadas ao modelo externo que resolve o problema de forma simultânea;
- Explorar a combinação entre o modelo matemático externo e o SIG, nos momentos de entrada de dados e geração da solução gráfica.

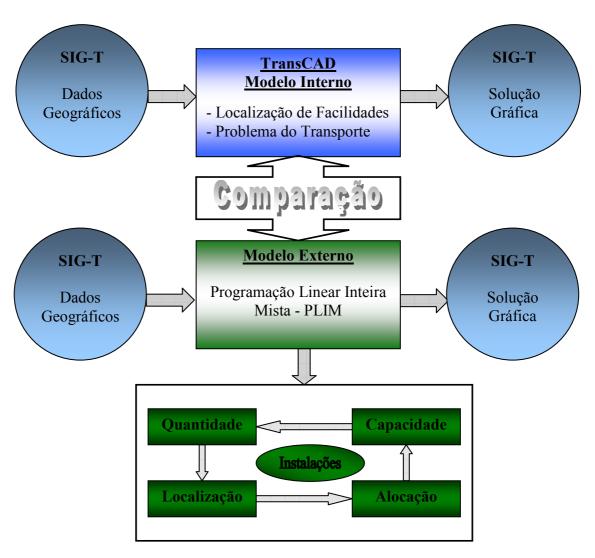


Figura 1.1 – Visão geral do trabalho

1.3 Justificativa e relevância do trabalho

O tema localização de instalações é de extrema importância e ampla abrangência, constituindo uma questão logística estratégica para empresas públicas ou privadas, e que atualmente vem sendo abordado por meio de sistemas de apoio à decisão, muitos deles baseados em SIG. Alguns trabalhos recentes envolvendo SIG aplicados à resolução de problemas de localização podem ser vistos em Lima (2003), Naruo (2003), Hoffmann e Gómez (2003), Morgado *et al.* (2005), Arakaki e Lorena (2006), Camargo e Cunha (2006), Carrara *et al.* (2006). A atualidade do tema é um dos elementos que justifica a relevância da pesquisa.

Diversos *softwares* são utilizados no auxílio a problemas de localização. Porém, a maioria deles, tal como o SIG TransCAD, acaba funcionando como uma "caixa preta": seus métodos de solução não são transparentes, restando aos usuários em geral a hipótese de acreditar na eficiência dessas soluções, não sendo capazes de avaliar o grau de precisão destas soluções. Nesse sentido, o trabalho busca avaliar a qualidade das soluções obtidas por um SIG específico para a resolução do problema de localização-alocação de instalações, quando comparadas com as supostas soluções ótimas, obtidas a partir de um modelo matemático externo otimizante. Conforme Lorena *et al.* (2001), a capacidade de um SIG aumenta consideravelmente quando se faz o uso combinado com técnicas de Pesquisa Operacional. Contudo, a integração de SIG com algoritmos de localização, apesar de bastante promissora, ainda não está totalmente difundida na comunidade científica internacional, justificando e ressaltando mais uma vez a relevância deste trabalho.

Outro ponto de destaque do trabalho é a interação entre o SIG e o modelo matemático externo PLIM, que se dará em dois momentos distintos: durante a entrada e saída de dados. Mesmo que, numa hipótese pessimista, a qualidade da solução matemática obtida pelos modelos do SIG seja ruim, não se pode negar o grande auxílio que o SIG traz nas fases de obtenção de dados e de apresentação e análise de resultados, através de suas ferramentas para geração de gráficos e mapas temáticos, entre outros. De acordo com Church (2002), não é difícil exportar dados a partir do SIG, que servirão de entrada para outro modelo de localização, externo ao SIG, que irá resolver o problema proposto, e então importar os resultados de volta ao SIG, para gerar os resultados gráficos em forma de mapa.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado em 7 capítulos. Após essa introdução, os capítulos 2, 3 e 4 apresentam a base conceitual utilizada para o desenvolvimento do trabalho. O capítulo 2 trata do tema localização de facilidades, suas diversas classificações, custos geralmente envolvidos, principais métodos de solução empregados e alguns trabalhos envolvendo estudos de localização já realizados. O capítulo 3 aborda os Sistemas de Informações Geográficas. São apresentados os componentes de um SIG, sua utilização no contexto dos Sistemas de Apoio à Decisão Espacial (SADE), as particularidades dos SIG-T (SIG aplicados à área de planejamento e operação em transportes) e também alguns trabalhos envolvendo aplicações de SIG à logística. No capítulo 4, são apresentadas as características técnicas e operacionais do SIG adotado na pesquisa, no que tange especificamente ao problema de localização-alocação de instalações, com destaque às suas rotinas para criação de matriz de custos, localização de facilidades e problema do transporte.

O capítulo 5 define e classifica a metodologia de pesquisa adotada no trabalho, além de apresentar as principais características do modelo matemático desenvolvido baseado em Programação Linear Inteira Mista (PLIM). O capítulo 6 traz a aplicação da metodologia em três simulações distintas. Em cada uma delas, são aplicados o modelo SIG e modelo PLIM em interação com o SIG, e posterior comparação e análise dos resultados. Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros, seguidos das referências bibliográficas utilizadas.

2 Problemas de Localização-Alocação de Instalações

Este capítulo traz um levantamento bibliográfico acerca do assunto localização-alocação de instalações. Aponta a importância do tema, por ser uma questão estratégica e de ampla abrangência, incorrendo em parcelas significativas de custos logísticos. Os problemas de localização são classificados segundo fatores tais como força direcionadora, número de instalações, escolhas de candidatos em um espaço discreto ou contínuo, grau de agregação dos dados envolvidos, e horizonte de planejamento. Os custos geralmente envolvidos nestes problemas são destacados e os principais métodos de solução são apontados. Ao final, apresentam-se algumas aplicações envolvendo estudos de localização.

Ramos (2000) atribui a Richard Cantillon o pioneirismo à economia espacial, ainda no século XVIII, com sua obra escrita em 1725 e editada em 1755, intitulada "Essai sur la nature du commerce en general", afirmando que é a preocupação em economia de transportes que leva algumas aldeias a se transformarem em locais de mercado, explicando também os fatores que influenciam na formação de cidades e capitais. Já Bowersox e Closs (2001) colocam que a relevância em estudos de localização é reconhecida a partir de meados do século XIX, momento em que o economista alemão Joachim Von Thünen publicou, em 1826, a obra "Der isolierte staat in Beziehung auf Landwitschaft und Nationalokonomie" (O Estado Isolado), o qual considerava os custos de transporte e o valor da terra como principais componentes do desenvolvimento econômico agrícola àquela época. No início do século XX, tendo por base os princípios de Von Thünen, Alfred Weber generalizou a teoria da localização para a área industrial, a qual englobava inúmeros locais de produção e consumo, distribuídos em uma área e interligados por custos de transportes linearmente proporcionais à distância e ao peso transportado.

Segundo Ballou (2006), Weber analisou a importância da matéria-prima em relação ao produto acabado para diferentes processos de produção e concluiu que, para minimizar os custos de transportes, as instalações devem estar localizadas próximas às fontes de matéria-prima, para mercados cujo processo de produção implica perda de peso, ou mais próximas ao mercado consumidor, quando esse processo gera aumento de peso no produto acabado. Porém, pode-se ainda haver uma distorção com relação ao custo do trabalho, correspondente à

atração exercida por centros vantajosos de mão-de-obra. Sabe-se que um sistema de transporte eficiente e barato contribui para aumentar a concorrência no mercado, diminuindo os preços dos produtos e tornando-os mais competitivos frente aos concorrentes.

Apesar da teoria da localização ter seu início ainda no século XVIII, poucas foram as aplicações realmente desenvolvidas até meados de 1960, momento em que a questão ganha interesse e uma ampla gama de trabalhos começa a ser desenvolvida e publicada (OWEN & DASKIN, 1998). Desde então, o problema de localização de instalações tem sido amplamente tratado na literatura, não sendo intenção deste trabalho esgotar o assunto, mas apenas apresentar os tópicos mais relevantes ao escopo desta pesquisa.

De acordo com Novaes (2004), o problema de localização de instalações tem sido tratado em seus vários níveis de complexidade, englobando desde problemas simples de localização de uma única instalação, até problemas que envolviam diversas instalações, em deferentes níveis de uma cadeia produtiva, com restrições de capacidade e considerações de previsões de mercado. Problemas de localização de instalações, também conhecidos como localização de facilidades, compreendem todas as localizações nas quais materiais e estoques, em processo ou acabados, são tratados, armazenados e transportados (BALLOU, 2006).

Genericamente, pode-se descrever o problema de localização de facilidades como a composição de dois conjuntos conhecidos: (1) Conjunto de clientes e suas respectivas demandas (quando existentes) pelo produto ou serviço desejado; (2) Conjunto dos lugares em potencial para a instalação das facilidades, juntamente com suas respectivas capacidades (quando aplicável) de oferta. Estes estudos objetivam a escolha do melhor local para uma ou mais instalações, dentro de um conjunto de locais possíveis, a fim de fornecer, em geral, um alto nível de serviço aos clientes, minimizar custos de operação, e/ou maximizar lucros. Segundo Hamad (2006), a maioria dos problemas de localização tem como função, em geral, a minimização de custos logísticos, principalmente os custos de transporte, em detrimento da maximização de lucros.

Problemas de localização-alocação são problemas de localização um pouco mais complexos. A solução destes problemas consiste em definir o número de facilidades a serem instaladas, suas respectivas localizações, além de determinar qual a porcentagem de demanda dos clientes deverá ser atendida por cada uma das facilidades, minimizando-se os custos de transportes e, quando presentes, respeitando-se as demandas e capacidades envolvidas. Esta será a abordagem utilizada no decorrer desta pesquisa, sempre quando se fala em problema de localização-alocação de instalações.

2.1 Importância dos estudos de localização

Conforme Ballou (2006), a importância de estudos de localização deriva dos altos impactos que decisões desta natureza exercem sobre os custos logísticos, por envolverem altos investimentos. O transporte absorve, em média, a porcentagem mais elevada de custos que qualquer outra atividade logística, representando 60% dos custos logísticos totais (FLEURY *et al.*, 2000). Ressalta-se, ainda, que os custos em transporte envolvam não somente custo monetário, bem como aspectos relacionados ao tempo de percurso, distância percorrida, oportunidade de escolha, dentre outros, que possuem diferentes influências para distintas classes de demanda. O fator tempo é um fator ainda mais crítico no caso de entrega de produtos aos consumidores.

Conforme Lorena *et al.* (2001), as aplicações de problemas de localização de instalações ocorrem tanto nos setores público quanto privado. No caso do setor privado, o objetivo principal é a minimização de custos logísticos. Em indústrias, atacadistas, varejistas e distribuidores, por exemplo, para se decidir o melhor local para instalar uma unidade, seja uma planta de produção, uma loja, um centro de distribuição ou armazenagem, deve-se sempre levar em consideração o posicionamento do mercado consumidor e de seus fornecedores, a disponibilidade de infra-estrutura, de mão-de-obra e de vários outros fatores que afetam a produção.

Alguns exemplos de trabalhos com aplicações em localização no setor privado são citados: centros de *cross-docking* para uma rede de produtos farmacêuticos (DOBRUSKY, 2003), terminais de consolidação para uma empresa de transporte de carga parcelada (SILVA, 2004), localização de fábricas e/ou depósitos em escala global para corporações transnacionais (HAMAD, 2006), localização de centros de distribuição de carga (VALLIM FILHO, 2004). Segundo este último autor, a localização de instalações é um problema que se relaciona a diversas questões que estão, direta ou indiretamente, associadas à produtividade das operações, estando ligada tanto a aspectos de abastecimento das plantas industriais, quanto à distribuição dos produtos acabados, passando ainda pela transferência de estoques entre fábricas e centros de distribuição, estando presente em todos os elos da cadeia logística.

No caso de setores públicos, as funções do problema de localização se repetem. Em termos gerais, os principais objetivos presentes na localização de instalações de equipamentos públicos são: estar o mais próximo possível da demanda, com o intuito de reduzir custos em

transportes; maximizar a área coberta, aumentando o nível de acessibilidade da demanda; ou reduzir ao máximo os custos com instalações, seja pela escolha de uma localização devido ao custo financeiro, ou pela quantidade de instalações a serem estabelecidas. Por outro lado, a economia obtida ao se deixar de construir uma unidade reduzirá as chances de oferta deste produto ou serviço, denotando, desta forma, a difícil conciliação entre a compensação (*tradeoff*) fatores econômicos e satisfação dos clientes. Uma questão importante e bastante atual é a crescente preocupação que as empresas têm em maximizar a satisfação dos clientes, sendo esta uma questão fundamental associada às estratégias empresariais e diretamente relacionada à localização de instalações. Exemplos de aplicações no setor público incluem: localização de creches e postos de saúde (LIMA, 2003; DUTRA, 1998), escolas públicas de ensino fundamental (PIZZOLATO & SILVA, 1997), estações de tratamento de esgoto e aterros sanitários (NARUO, 2003), localização de áreas públicas de lazer (YEH & CHOW, 1996), gestão ambiental de recursos naturais (KLISKEY, 1995).

Segundo Arakaki e Lorena (2006), estudos de localização de facilidades são um aspecto crítico no planejamento estratégico para um grande espectro de empresas: seja para um empresário que quer construir uma nova loja, para um industrial que deseja situar uma nova fábrica, ou para um administrador público que deseja estabelecer postos de saúde ou escolas. Estes são freqüentemente desafiados pela dificuldade de decidir por um local adequado, pois antes de uma instalação ser adquirida ou construída, boas localizações devem ser identificadas, especificações das capacidades devem ser determinadas e grandes quantidades de capital devem ser alocadas. O estudo de localização de instalações é, assim, uma questão abrangente, afetando uma variedade de setores, nas mais diversas áreas da atividade econômica.

Um outro fator a destacar com relação aos estudos de localização, apontado por Ballou (2006), é que estes envolvem uma decisão, na maioria das vezes, definitiva, caracterizando seu enfoque estratégico, uma vez que é a partir da localização que se dá formato e estrutura para toda a rede logística. Conforme Naruo (2003), o procedimento de localização de facilidades é primordial, pois uma vez definida a rede, todas as outras decisões logísticas gerenciais e táticas, como análises subseqüentes de roteirização e programação de veículos, se apoiarão na melhor opção de localização.

2.2 Classificação dos problemas de localização

Ballou (2006) classifica os problemas de localização segundo cinco fatores: sua força direcionadora, pelo número de instalações a localizar, por escolhas de candidatos em um espaço discreto ou contínuo, por grau de agregação dos dados envolvidos, e pelo horizonte de tempo de planejamento.

A força direcionadora diz respeito ao principal objetivo da estratégia de localização como, por exemplo, fatores econômicos ou de acessibilidade, que podem ser dominantes quando se têm objetivos diferentes de localização. O trabalho apresentado por Lima (2003), ao efetuar a localização de escolas e postos de saúde, teve como característica específica preocupação com critérios de maximização de acessibilidade e cobertura da demanda, diferente da abordagem adotada por Vallim Filho (2004), cujo enfoque foi dado à redução de custos logísticos globais de centros de distribuição de carga, representados pelos custos de transporte, de instalações, de estoques, de armazenagem e movimentação de materiais e custos de vendas perdidas. Geralmente, a força direcionadora de problemas de localização diz respeito à maximização dos lucros da empresa ou à minimização de custos envolvidos, ou para objetivos específicos, como a minimização das distâncias ou tempos de transporte, associado ao atendimento das demandas consideradas. No trabalho desenvolvido nesta pesquisa, a força direcionadora que compõe o objetivo da estratégia de localização dará especial atenção aos fatores econômicos, aqui representados pelos custos logísticos de transporte, medidos em termos das distâncias percorridas entre pontos de oferta e demanda.

Quanto ao número de instalações, pode-se desejar determinar a localização de uma única instalação ou de múltiplas instalações. Conforme Silva (2004), o problema de localização de uma única instalação pode ocorrer quando uma possível instalação está tão isolada das demais que a demanda a ser atendida por ela passa a ser considerada independente da demanda a ser atendida pelas demais instalações, possibilitando a decomposição do problema de localização de *n* instalações em *n* sub-problemas independentes, o que, certamente, reduz a complexidade do problema. A maior parte dos trabalhos evidenciados na literatura trata do problema de localização de múltiplas instalações, uma vez que abordam de forma mais abrangente os atuais requisitos de mercado. Envolve, geralmente, considerações a respeito do número ideal de instalações, das parcelas de demanda a serem atendidas por cada uma das instalações, suas respectivas localizações, capacidades e a área de influência das mesmas. O problema abordado nesta pesquisa enquadra-se na localização múltipla de

instalações, tidas quando duas ou mais instalações podem ser localizadas simultaneamente, de forma interdependente, fator este que aumenta a complexidade do problema, pois há total vinculação entre localização, alocação, capacidades máximas e quantidade de instalações.

Além disto, os problemas podem envolver a escolha de locais candidatos á localização de instalações em um espaço contínuo, onde qualquer ponto na rede é um possível candidato à abertura de uma nova instalação. Em outra abordagem, a escolha pode ser feita em um espaço discreto, ou seja, a seleção é feita em um conjunto de escolhas possíveis e viáveis, que tenham sido pré-selecionadas por sua razoabilidade, sendo este o método mais empregado quando se tem a localização de múltiplas instalações (BALLOU, 2006). Neste sentido, Crainic (1998) classificou os modelos de localização em dois tipos, baseados na representação espacial da região considerada e na malha de transportes envolvida. O primeiro tipo trata a localização no plano, o que, teoricamente, implica a existência de infinitos pontos alternativos para a pretendida localização, e a existência de uma malha de transportes bastante densa, cobrindo praticamente toda a região considerada. Já o segundo tipo trata a localização num grafo ou numa rede, o que implica a representação de malhas de transporte existentes e a consideração de um número finito de pontos alternativos para a localização, situadas em nós da rede. Segundo Silva (2004), métodos de Pesquisa Operacional, como a programação linear, programação inteira ou programação mista, assim como a teoria de grafos e fluxo em redes, formam a base dos modelos matemáticos utilizados nesta segunda abordagem, e é onde se situa o presente estudo, em que a escolha de candidatos se dará em espaço discreto da rede.

Quanto ao grau de agregação dos dados, quando se tem um problema de grande porte, com muitas variáveis envolvidas, para que o problema se torne tratável computacionalmente, é, geralmente, necessário fazer a agregação de alguns dados. Um exemplo pode ser visto no trabalho de Vallim Filho (2004), ao definir uma modelagem matemática para construção de zonas de *clusterização* e posterior seleção dos melhores candidatos à localização. Existem diferentes formas de agregação de dados espaciais, como através de códigos de endereçamento postal, distritos urbanos ou regiões administrativas. Mas, na verdade, algumas normas gerais devem ser seguidas no processo de agregação. No trabalho proposto nesta pesquisa também será proposta, em alguns momentos, a agregação de dados, conforme será visto em seções posteriores.

Segundo Silva (2004), ainda há que se distinguir a macro-localização da micro-localização. A primeira precede a segunda e se refere à escolha de uma região para localização da instalação pretendida, enquanto que a segunda está associada à escolha de um

sítio específico, dentro da região, para implantação da instalação. Aos problemas de macrolocalização é mais adequada a aplicação de métodos que consistem no estabelecimento de um modelo representativo da realidade, passível de tratamento matemático. Já os problemas de micro-localização envolvem um número muito grande de variáveis, e até mesmo fatores pessoais e políticos na tomada de decisões, o que limita, em alguns casos, a adoção de modelos matemáticos, segundo o autor.

Outra classificação que se pode ter envolvendo problemas de localização é com relação ao horizonte de planejamento. Crainic (1998) cita os níveis de planejamento em que as diferentes decisões logísticas de localização se enquadram:

- Nível estratégico: são decisões que envolvem a alta gerência e requerem grande investimento de capital, dentro de um horizonte de planejamento de longo prazo. Os dados são geralmente agregados e há um maior nível de flexibilidade. Decisões estratégicas determinam as políticas gerais da empresa. Exemplos de decisões neste nível de planejamento envolvem a determinação do número de instalações em operação, suas respectivas localizações e capacidades.
- Nível tático: ou nível gerencial, é o planejamento da rede logística no horizonte de médio prazo, por exemplo, quando se define a alocação de clientes aos centros de distribuição, e destes às suas respectivas fábricas, a fim de aumentar o desempenho do sistema logístico. Neste nível, há uma mistura de dados agregados e detalhados, o nível de flexibilidade é intermediário, as políticas ainda são abstratas e as decisões são sensíveis a grandes variações dos dados e parâmetros do sistema, tal como variações sazonais de demanda. Outros exemplos de decisões dentro deste nível englobam a roteirização de veículos, a programação e o seqüenciamento de atividades.
- Nível operacional: são as decisões de chão-de-fábrica, tomadas pelos gerentes locais, num horizonte de curto prazo, e em ambientes altamente dinâmicos, com baixa flexibilidade, onde o tempo de resposta deve ser mínimo. Possuir a representação detalhada das instalações, veículos e atividades é tarefa essencial. Como exemplo de decisões neste nível, pode-se citar a localização e movimentação de materiais dentro de armazéns, a programação de tripulações ou a alocação de recursos escassos, como, por exemplo, a realocação de clientes em caso de parada de uma linha de produção em uma fábrica.

O problema de localização proposto neste trabalho enquadra-se nos níveis de planejamento estratégico e gerencial, pois envolve decisões sobre o número de instalações, suas localizações e capacidades físicas e, além disto, no nível tático, no momento em que define as alocações, ou seja, os fluxos de transporte entre os centros de demanda e oferta. Alguns fatores que podem vir a reduzir a capacidade de operação de uma dada instalação são, por exemplo, a disponibilidade e custo do solo, a capacidade da frota de veículos alocada àquela instalação, espaço físico de armazenagem, restrições políticas ou mesmo ambientais.

Owen e Daskin (1998) e Crainic (1998) apresentam uma revisão de literatura sobre os modelos de localização, classificando-os de acordo com os seguintes modelos: estático-determinísticos, dinâmicos e estocásticos. O Quadro 2.1 faz um resumo dos modelos estático-determinísticos de localização de instalações.

Com relação aos modelos dinâmicos e estocásticos, estes lidam explicitamente com incertezas inerentes à localização de instalações, que podem ser problemas extremamente difíceis de serem resolvidos. A natureza estratégica de problemas de localização de facilidades requer que um modelo razoável considere alguns aspectos associados à evolução temporal e às incertezas futuras. Desde que a localização ou realocação de facilidades envolve um alto investimento, espera-se que seu período de operação envolva um longo horizonte de planejamento. Os modelos dinâmicos podem ainda ser divididos em determinísticos ou estáticos, e lidarem com informações incompletas ou errôneas. Estes modelos tratam da localização de uma única facilidade ou de múltiplas facilidades (OWEN & DASKIN, 1998).

Já os modelos estocásticos tratam as incertezas de inúmeros parâmetros do sistema, considerando que se tem um conhecimento limitado destes parâmetros, como tempos de viagem, custos de construção, quantidade ou locais de demanda. Estes modelos podem ser divididos em duas outras categorias: abordagem probabilística ou planejamento de cenários. Nos modelos probabilísticos, há a explícita consideração da distribuição de probabilidades associada às variáveis aleatórias. Por exemplo, uma ambulância localizada pode não estar disponível quando requisitada, por estar atendendo outro chamado. Neste caso, considera-se a possibilidade de ocorrência deste tipo de evento, incluindo no modelo medidas de probabilidade. Já na abordagem do planejamento de cenários, considera-se um conjunto de possíveis valores futuros para as diversas variáveis, geradas pelos tomadores de decisão, gerando simulações sobre os possíveis cenários futuros a analisar.

Problema	Descrição
Modelo de Medianas	Localizar p instalações nos vértices de uma rede e alocar a demanda a estas instalações, de tal forma a minimizar as distâncias percorridas. Se as instalações são não-capacitadas e p é fixo, temos então o problema das pmedianas, onde cada vértice é designado para sua instalação mais próxima. Se p é uma variável de decisão e as instalações são capacitadas ou não capacitadas, isto define o Problema de Localização de Instalações Capacitadas ou Não-Capacitadas, respectivamente. Estes modelos são relevantes para o projeto de serviços logísticos e distribuição de cargas.
Máxima Captura	É o problema das p-medianas modificado, onde o objetivo é maximizar o número de novos clientes capturados, levando em consideração a presença de concorrentes.
Cobertura de Conjuntos	Baseia-se na distância ou tempo de viajem máximos aceitáveis, buscando a minimização do número de facilidades necessárias para garantir certo nível de cobertura de clientes. Assume um conjunto finito de localizações. É muito utilizado na localização de serviços públicos, tais como centros de saúde, agências de correio, bibliotecas ou escolas.
Máxima Cobertura	Considerando o caso de um orçamento fixo, os recursos disponíveis são utilizados para atender o máximo possível de clientes cobertos pelo serviço, dentro de uma distância aceitável, localizando um número fixo de instalações. Assume um conjunto finito de localizações.
Modelo de Centros	É um problema <i>minimax</i> cujo objetivo é minimizar a máxima distância entre os pontos de demanda e a facilidade mais próxima. Deseja-se cobrir toda a demanda procurando localizar certo número de facilidades, desde que minimize a distância coberta. Quando a localização da facilidade está restrita ao nó da rede, tem-se o problema de centro de vértice. Caso se permita a localização em qualquer lugar da rede, o problema é de centro absoluto. São modelos principalmente aplicados a serviços de emergência, tais como estação de bombeiros e de ambulâncias.
Localização de facilidades a custo fixo	Problemas que possuem um custo fixo (aquisição, construção) associado à localização de cada área potencial. É uma variante dos problemas das pmedianas.
Modelo de Localização- Alocação	Localizam-se as instalações por um dos métodos já citados e alocam-se fluxos entre as facilidades e as demandas, simultaneamente.
Anti-Mediana	O objetivo é maximizar a distância média entre pontos de oferta e de demanda.
Anti-Centro	O objetivo é maximizar a distância mínima entre pontos de oferta e de demanda. Esta abordagem é muito utilizada ao se localizar aterros sanitários e locais de incineração.

Quadro 2.1 – Classificação de problemas de localização

O foco desta pesquisa está direcionado à categoria dos problemas estáticodeterminísticos que, ainda segundo Owen e Daskin (1998), representam a grande maioria das aplicações práticas. Mais especificamente, este trabalho propõe o modelo de localizaçãoalocação, em que se localizam as instalações segundo uma variante do modelo das pmedianas, e alocam-se fluxos entre ofertas e demandas, simultaneamente. O objetivo é localizar p facilidades (medianas), de forma a minimizar a soma das distâncias de cada vértice (cliente) à sua facilidade mais próxima.

2.3 Custos presentes em modelos de localização-alocação

Segundo Vallim Filho (2004), todos os estudos de localização têm como pano de fundo a minimização de custos em uma rede logística. O processo de localizar e quantificar instalações envolve um conjunto de complexas compensações e evoluções de custos, sendo que uma parte deles segue evoluções lineares, e outra parte segue evoluções nitidamente não-lineares, como no caso da variação dos custos de estoque, que sofre um incremento à medida que o número de instalações aumenta. Em sua tese, este mesmo autor considerou os seguintes componentes de custos: armazenagem, movimentação de materiais, estoques em armazém, estoques em trânsito, transporte, distribuição, vendas perdidas e administração. Estes componentes de custos foram considerados em duas fases distintas de modelagem:

- Primeira Fase: objetivou a localização das instalações, implementada a partir de modelo exato baseado em Programação Linear Inteira Mista, contendo apenas custos linearmente distribuídos, como os custos de transporte, referentes à transferência de carga entre fontes produtoras ou de armazenagem a regiões de demanda, bem como os custos de localização, que evoluem de acordo com a necessidade de volumes a movimentar, representando a necessidade de área de armazenagem. Sendo assim, o modelo baseado em programação linear contemplou apenas os custos que podem ser considerados lineares, sem perda de realismo.
- Segunda Fase: responsável pela quantificação de instalações, abordando custos modelados de maneira específica, que consideram as particularidades de comportamento, inclusive uma eventual não-linearidade. Os custos que seguem tendências nitidamente não-lineares são os custos de estoques, custos de armazenagem e movimentação de materiais, e custos de vendas perdidas. Como o custo logístico é uma composição de custos, foi possível desenvolver um submodelo adequado a cada componente de custo, que variou justamente com a quantidade de instalações.

Posteriormente, os custos presentes na segunda fase foram incorporados à primeira, gerando a montagem do custo logístico global. Com relação aos componentes de custos presentes na segunda fase da modelagem desenvolvida por Vallim Filho (2004), os custos de estoque remetem à idéia de custo de oportunidade, quando um capital encontra-se imobilizado, sem aplicação financeira ou na produção, sendo que esta quantia só será recebida numa data futura, perdendo-se assim, a oportunidade do investimento. Os custos de armazenagem e movimentação de materiais dizem respeito aos custos de operação das instalações, referentes à estrutura necessária para desenvolver os processos de armazenagem e movimentação dos materiais. São considerados os custos fixos que correspondem a equipamentos, mão-de-obra e ao próprio imóvel utilizado na armazenagem e movimentação dos materiais. Já os custos de vendas perdidas correspondem aos ganhos não auferidos por receitas que não se concretizaram, devido a deficiências logísticas, ou seja, operações que não estão em conformidade com o nível de serviço proposto. Estas perdas, em geral, estão associadas a questões do tipo: cortes em pedidos por faltas em estoque, cancelamentos de pedidos por um atendimento insatisfatório, devoluções devido a erros de pedidos e atrasos em entregas devido a falhas de distribuição.

Ao se refletir somente sobre a localização de instalações, desconsiderando-se, por um momento, a questão de sua quantificação, percebe-se que a localização de um certo número de instalações depende, basicamente, do custo de transporte e do custo do local, refletido no custo de uso do solo onde será instalada (BOWERSOX & CLOSS, 2001). Segundo Pires (2006), uma característica comum aos estudos de localização, e que permanece até hoje, é a importância atribuída aos custos de transporte na determinação da localização de instalações. Somente esta parcela de custos foi considerada para o desenvolvimento desta pesquisa.

Dobrusky (2003), em seu trabalho, levou em consideração custos fixos de transporte e de operação de instalações. Nos custos de transporte estão presentes os custos para distribuição do centro de produção para os centros de *cross docking*, e destes para os demais pontos de demanda, por meio de latitudes e longitudes dos pontos considerados, calculando-se as distâncias euclidianas. O custo de transporte total é calculado em função das distâncias, ponderado pelas demandas, que influenciam o número de entregas e paradas associadas, e também pela freqüência, que determina a quantidade de viagens a serem feitas em um intervalo de tempo. Nos custos associados à operação dos centros de *cross docking*, levou-se em consideração os custos fixos gerais, como de supervisão, administração, o aluguel proporcional à área de capacidade da instalação e a mão-de-obra operária. Estes custos foram

divididos em níveis de capacidade, em iguais intervalos, ou seja, para cada intervalo de capacidade da instalação está associado certo custo, até que se atinjam os limites de capacidades considerados.

Owen e Daskin (1998) e Crainic (1998) fizeram revisões dos principais métodos de otimização utilizados na resolução de problemas de localização e concluíram que os modelos matemáticos utilizados baseiam-se em critérios de otimização que utilizam fatores de custos relacionados principalmente ao transporte e custos de abertura e operação de novas instalações.

2.4 Métodos de solução para o problema de localização-alocação

Por mais que possam parecer simples, problemas de localização-alocação caracterizamse pela complexidade das decisões, exigindo uma análise combinatória para integrar suas diversas variáveis, principalmente as de demanda e transporte, que compõe grandes volumes de dados. Esta complexidade é devida ao fato de a análise ter que lidar com um conjunto extenso de variáveis de decisão que se influenciam mutuamente. Além disto, o número de possíveis alternativas a serem analisadas e comparadas é muito alto, mesmo para problemas de pequeno porte (LACERDA, 1999).

Para tratar de maneira eficaz essa complexidade e volume de dados envolvidos, fazemse necessário o uso de técnicas sofisticadas de modelagem e análise. Segundo Bowersox e Closs (2001), essas técnicas podem ser divididas em:

- Técnicas analíticas;
- Técnicas de melhoria ou programação exata;
- Técnicas de simulação.

Técnicas analíticas são adequadas para aplicação em problemas mais simples, por exemplo, quando se deseja localizar uma única instalação. Esta técnica tem por base o método do centro de gravidade geográfico de uma rede logística (BALLOU, 2006), um método exato que procura minimizar a soma das distâncias dos pontos de demanda à instalação. Na aplicação do método, determina-se a posição inicial do centro de gravidade de todo o conjunto

de pontos. Em seguida, calcula-se a distância de cada ponto para esta localização inicial e, através de iterações sucessivas, vai-se determinando novas posições para a instalação, considerando-se as distâncias aos pontos de produção e/ou demanda.

As técnicas de programação exata e de simulação são mais abrangentes que a anterior, empregadas para tratar problemas de localização de múltiplas instalações. As técnicas de melhoria ou programação exata são também chamadas técnicas de otimização, por gerarem soluções matematicamente ótimas, ou próximas ao ótimo. Técnicas de simulação executam tentativas de reproduzir uma situação real a fim de compreender seu comportamento ou avaliar suas diversas estratégias futuras. Sua maior vantagem, em relação às técnicas de programação linear, é a capacidade de lidar com problemas complexos, envolvendo grande número de variáveis, além de sua flexibilidade na avaliação de cenários alternativos. A estas técnicas de simulação estão associadas técnicas heurísticas, subordinadas a cada aplicação específica. A seguir, são descritas as duas principais abordagens para resolução do problema de localização e alocação de instalações: programação exata e programação heurística.

2.4.1 Programação Exata

Segundo Ballou (2006), a programação exata é um procedimento capaz de garantir uma solução matematicamente ótima, sendo uma abordagem ideal para qualquer tipo de problema, em especial para o problema de localização de facilidades. Estas são as ferramentas de planejamento estratégico e tático mais amplamente utilizadas para a resolução de problemas de localização (CHURCH & SORENSEN, 1996; LACERDA, 1999; BALLOU, 2006; VALLIM FILHO, 2004).

De forma geral, a programação linear é uma técnica exata que tem como objetivo a maximização ou minimização de uma função linear, denominada função objetivo, respeitando a um sistema de equações lineares, que recebe o nome de restrições do modelo. A função objetivo a ser otimizada está geralmente voltada para a maximização dos lucros da empresa ou para a minimização de custos envolvidos. As restrições normalmente representam limitações de recursos disponíveis, ou exigências e condições que devem ser cumpridas para que as soluções geradas respeitem a normas impostas pela empresa ou por legislações trabalhistas. As soluções que atendem a todas as restrições recebem o nome de soluções

viáveis. A melhor das soluções viáveis, ou seja, aquela que otimiza o processo, minimizando ou maximizando a função objetivo, é denominada solução ótima do modelo.

Contextualizando para os problemas de localização de facilidades, que envolvem a escolha da melhor localização para uma ou mais facilidades, a partir de um conjunto de possíveis locais candidatos, alguns objetivos podem incluir: obter o maior nível de acessibilidade para determinada demanda; reduzir a distância máxima entre pontos de oferta e demanda; determinar o número de facilidades necessárias para garantir determinado nível de serviço; maximização de lucro ou minimização de custos. Decisões deste tipo deverão estar modeladas na função objetivo de cada problema de localização.

Além da função objetivo, os problemas de localização estarão submetidos a um conjunto de restrições financeiras e operacionais, geralmente presentes nestes tipos de problemas. Cada facilidade candidata pode trazer consigo um custo fixo associado à sua localização e/ou operação, tais como a aquisição de terreno, custos de construção e/ou custos de administração. A existência prévia de facilidades já instaladas constitui uma complicação, visto que afetam a escolha de localização de novas facilidades, ou mesmo o fechamento de uma ou mais facilidades existentes.

Programação Linear Inteira Mista

A programação exata implementada com base em Programação Linear Inteira Mista é a mais empregada para resolução de problemas de localização, principalmente quando estruturados a partir do modelo das medianas (CHURCH & SORENSEN, 1996; LACERDA, 1999; VALLIM FILHO, 2004), e conduzindo para a solução matematicamente ótima do problema.

O modelo das medianas pode ser definido em uma rede, composta por arcos e nós. Cada nó é considerado um local de demanda, assim como um ponto potencial para localização de uma nova instalação. Os arcos estabelecem um *link* de acessibilidade entre os nós, e podem vir a representar os fluxos de transporte entre os nós interligados. Este modelo pode definir certo número de instalações em nós de uma rede. Isto é possível graças à programação inteira que, com o uso de variáveis binárias, permite que se definam quais pontos contêm instalações ativas e também quais pontos de demanda são atendidos por determinados pontos que representam instalações ativas. Carrara *et al.* (2006) definem as funções dos arcos como de

transporte, coleta e entrega, e as funções dos nós incluem o armazenamento, depósito, manipulação, processamento, estacionamento, embalagem, carga ou descarga de produtos ou serviços.

Conforme Vallim Filho (2004), os modelos de Programação Linear Inteira Mista envolvem variáveis inteiras e/ou reais não negativas, assim como variáveis binárias, essenciais na formulação de problemas de localização. Estes modelos são estruturados como um modelo de programação linear, porém com restrições adicionais de integralidade, as quais impõem que variáveis assumam valores inteiros. Os problemas que possuem todas as variáveis inteiras são denominados problemas de programação inteira, enquanto aqueles que contêm pelo menos uma variável inteira juntamente com variáveis não-inteiras são denominados problemas de programação mista.

Church e Sorensen (1996) apresentam a formulação do problema de localização de instalações, implementado segundo a Programação Linear Inteira Mista, baseada no modelo das p-medianas, conforme a seguinte notação:

i, I: índice e conjunto de pontos de demanda, usualmente representando nós na rede;

j, J: índice e conjunto de pontos de oferta, usualmente representando nós na rede;

 $d_{i,j}$: distância ou tempo entre nós de demanda i e nós de oferta j;

p: número de facilidades a serem localizadas;

a_i: a soma de demanda do nós *i*;

 $X_{i,j}$: assume valor igual a 1 se o nó de demanda i está associado ao nó de oferta j, e assume valor igual a 0 caso contrário.

 Y_j : assume valor igual a 1 se o nó j for selecionado como uma facilidade ativa, e assume valor igual a 0 caso contrário.

Dada a notação, o modelo das p-medianas pode ser formulado da seguinte forma:

Minimizar
$$Z = \sum_{i} \sum_{j} a_{i} * d_{i,j} * X_{i,j}$$
 (2.1)

Sujeito às restrições:

Restrição de cobertura dos nós de demanda

$$\sum_{j} X_{i,j} \ge 1 \quad para \ todo \ i \in I \tag{2.2}$$

Restrição de número de facilidades abertas

$$\sum_{j} Y_{j} = p \tag{2.3}$$

Restrição de abertura de facilidade

$$X_{i,j} \le Y_j \quad para \ cada \ i \ e \ j$$
 (2.4)

Restrição de Integralidade

$$Y_{j} = 0 \text{ ou } 1 \text{ para cada } j \in J$$
 (2.5)

Este modelo é aplicado quando os nós da rede representam pontos de demanda ou oferta, assim como um local candidato à abertura de uma nova facilidade, ou quando o conjunto de candidatos está restrito a algum conjunto discreto de nós na rede, previamente definido. A variável Z armazena o valor da função objetivo, a ser minimizada (Equação 2.1). Quando um nó de demanda i estiver associado a uma facilidade localizada em j, então $X_{i,j} = 1$ e a parcela da distância entre estes nós, multiplicada pela demanda, representada pela expressão $a_i * d_{i,j}$, será incluída no somatório da função objetivo. A restrição de cobertura dos nós de demanda (Equação 2.2) assegura que cada ponto de demanda deverá estar associado a, no mínimo, uma facilidade. A restrição de número de facilidades abertas (Equação 2.3) garante que o número máximo de facilidades localizadas-alocadas estará restrita à quantidade p. A restrição de abertura de facilidade (Equação 2.4) assegura que somente haverá fluxo associado aos nós i e j se o nó j for escolhido como uma facilidade em operação. A restrição

de integralidade (Equação 2.5) garante que a variável Y_j assume valores inteiros binários, pertencentes ao conjunto 0 ou 1.

Problemas de localização baseados em modelos de medianas são geralmente abordados através de métodos exatos, como a Programação Linear Inteira Mista. Estes métodos apresentam como principal restrição operacional o tempo de processamento e memória computacional necessários para realizar todas as operações que levam à solução matemática ótima. Sendo assim, sua grande desvantagem é que, dependendo do tamanho do problema, são necessários longos tempos de processamento, podendo até tornar inviável sua solução.

Church e Sorensen (1996) apontam que o uso de modelos de programação exata que utilizam o algoritmo *branch and bound* está limitado a encontrar uma solução global efetivamente ótima para problemas com no máximo 150 nós na rede. Um algoritmo de *branch and bound* é um método de busca em árvore com enumeração inteligente das soluções candidatas à solução ótima de um problema, efetuando sucessivas partições do espaço das soluções e cortando a árvore de busca através da consideração de limites calculados ao longo da enumeração. O cálculo dos limites para o valor da solução ótima é uma parte fundamental de um algoritmo *branch and bound*, pois são usados para limitar o crescimento da árvore. Segundo este mesmo autor, a utilização de técnicas mais robustas, como a relaxação lagrangeana com subgradiente de otimização, faz aumentar a capacidade de lidar com problemas de otimização mais complexos, da ordem de 800 a 900 nós na rede. Sendo assim, algoritmos exatos são utilizados apenas em soluções de problemas com um número restrito de variáveis e restrições.

Dependendo das dimensões do problema, a complexidade do algoritmo da solução se eleva de forma exponencial, o que inviabiliza a obtenção de solução ótima dentro de um tempo computacional razoável. Problemas de otimização complexos, difíceis de serem solucionados devido ao grande número de combinações, são classificados como *NP-Hard* (Não Polinomiais - Difíceis), impossibilitando seu tratamento por técnicas exatas. Para problemas de grande porte, ditos complexos por não gerarem solução em tempo polinomial, utiliza-se geralmente como método de solução abordagens heurísticas, ou mesmo uma combinação de métodos exatos e heurísticos. Os métodos heurísticos, ao contrário dos exatos, exigem menos recursos computacionais, porém são menos rigorosos na identificação das melhores alternativas de solução, estando aptos a encontrarem uma boa solução, eventualmente à ótima.

2.4.2 Programação Heurística

Hamad (2006) afirma que a literatura a respeito de modelos de localização é vasta e abrangente, e que até a década de 90 predominavam os modelos baseados em Programação Linear Inteira Mista, mas que, recentemente, houve um crescimento acelerado de modelos formulados por heurísticas. Conforme Vallim Filho (2004), as heurísticas vêm ganhando destaque como método de solução de problemas de localização, devido ao aumento na complexidade dos problemas e a necessidade de redução do tempo na geração de respostas, mesmo apesar destas técnicas não garantirem a solução matemática ótima.

Conforme Ribeiro (1996), heurísticas são métodos de busca local, destinadas a encontrar uma boa solução, eventualmente a ótima, consistindo na aplicação, em cada passo, de uma heurística subordinada, a qual é modelada para cada problema específico. Contrariamente às heurísticas convencionais, as metaheurísticas são de caráter geral, aplicáveis a uma gama de diferentes problemas, e possuem condições especiais para escapar de ótimos locais, partindo em busca da melhor solução global. Nem sempre um ótimo local é um ótimo global (a melhor de todas as soluções). Um ótimo local será um ótimo global só quando o problema apresentar características específicas, tal como convexidade. Uma heurística não garante a solução ótima global, mas ela determina vários ótimos locais e escolhe o melhor deles. Pode ser computacionalmente impossível se encontrar uma solução ótima global em algumas aplicações, entretanto, uma solução ótima local pode ser bastante eficiente. Em muitos casos, encontrar o ótimo global não é necessário. Encontrar rapidamente uma boa solução (ótimo local) pode ser mais desejável do que encontrar demoradamente a melhor solução possível. As principais metaheurísticas, referenciadas e comparadas por Church e Sorensen (1996) e Ribeiro (1996), destinadas à resolução de problemas de localização são apontadas no Quadro 2.2.

Traduzida por Algoritmos genéticos, é uma metaheurística proposta por Holland (1975), com o intuito de aplicar a teoria da evolução das espécies de Darwin, utilizando os conceitos de genes, cromossomos, cruzamento, mutação e seleção, em quaisquer problemas de otimização. São procedimentos adaptativos que simulam a evolução de uma população de indivíduos, cada um deles representando uma possível solução de um dado problema de otimização. Cada indivíduo é caracterizado por um cromossomo que codifica as características Genetic Algorithms relevantes ao problema. A população evolui iterativamente através de processos (GA)de seleção dos indivíduos mais bem adaptados, segundo uma dada função objetivo. Estes indivíduos têm seus cromossomos combinados de uma forma que possibilite a obtenção de novas gerações de indivíduos cada vez mais aptos. Para que seja induzida uma maior diversidade entre os indivíduos, são utilizados, também, mecanismos de mutação. Ao fim de todo o processo, o melhor indivíduo encontrado corresponderá a uma solução heurística para o problema. O método GRASP, traduzido por Procedimento de Busca Adaptativa Gulosa e Randomizada, é um método proposto inicialmente por Feo e Resende (1995). Este método consiste de duas fases: uma fase de construção, na qual uma solução é gerada, elemento a elemento; e de uma fase de busca local, na qual um ótimo local Greedy Randomized na vizinhança da solução é pesquisado. Esta vizinhança é constituída, geralmente, Adaptive Search por movimentos de troca e/ou substituição de candidatos. A melhor solução Procedure encontrada ao longo de todas as iterações GRASP realizadas é retornada como resultado. Assim como em muitas técnicas determinísticas, as soluções geradas (GRASP) pela fase de construção do GRASP provavelmente não são ótimas com respeito à definição de vizinhança adotada. Daí a importância da fase de busca local, a qual objetiva melhorar a solução construída, sendo que a eficiência da busca local depende da qualidade da solução inicial gerada. Conhecida como Busca Tabu (BT), é uma técnica originada nos trabalhos de Fred Glover (GLOVER, 1986) e Pierre Hansen (HANSEN, 1986). A Busca Tabu é um procedimento adaptativo, baseado em movimentos de troca/substituição, que Tabu Search utiliza uma estrutura de memória, ou Lista Tabu, para guiar um método de descida a continuar a explorar o espaço de soluções, mesmo na ausência de movimentos (TS) de melhora, evitando que haja a formação de ciclos, isto é, o retorno a um ótimo local previamente visitado. Simulated Annealing pode ser traduzido por Recozimento da Temperatura. É uma classe de metaheurística proposta originalmente por Kirkpatrick et al. (1983), Simulated Annealing sendo uma técnica de busca local probabilística, que se fundamenta em uma analogia com a termodinâmica, ao simular o resfriamento de um conjunto de (SA)átomos (ou facilidades, no caso do problema de localização) aquecidos. O VNS, ou Método de Pesquisa em Vizinhança Variável, proposto por Mladenovic e Hansen (1997), está baseado em uma troca sistemática de estruturas de vizinhanças associado a um algoritmo de busca local. Nesse algoritmo, parte-se de uma solução inicial qualquer. Então, o processo de busca começa por selecionar um local, escolhido de forma aleatória como candidato, e realiza um Variable Neighborhood movimento de troca deste candidato, formando uma estrutura de vizinhança com Search cada uma das possíveis localizações. Cada troca efetuada está relacionada a uma (VNS) função objetivo que mensura a qualidade da solução. Se uma destas trocas melhorarem a solução corrente, então a troca é efetivamente realizada. O processo continua escolhendo outra solução como candidata, que é então submetida ao método de busca. Este procedimento é encerrado quando nenhuma troca entre candidatos e localizações de facilidades existentes pode melhorar a função objetivo que representa a melhor solução corrente.

Quadro 2.2 – Metaheurísticas a serem aplicadas a problemas de localização

2.5 Aplicações práticas em estudos de localização de instalações

Pizzolato e Silva (1997) fizeram um estudo de localização no qual o principal objetivo foi alocar os pontos de oferta (escolas) o mais próximo possível dos clientes (alunos), de forma a reduzir a distância total percorrida entre a escola e a residência do aluno. Para isto, fez-se o uso de um modelo de localização baseado no modelo das p-medianas, com arcos não-capacitados. O trabalho foi aplicado a duas cidades do estado do Rio de Janeiro, Nilópolis e Nova Iguaçu. Para realizar a pesquisa, usou-se de mapas divididos em setores sencitários e informações da distribuição espacial dos estudantes. A população analisada compõe-se de alunos cujas idades variam entre 7 a 14 anos, matriculados no ensino fundamental. Como resultado do estudo feito, uma proposta de localização ideal foi criada, obtendo-se uma nova solução, melhor que a localização real, revelada pela melhor distribuição das escolas no mapa. Com o modelo de localização, são apresentadas as áreas com carência de vagas em escolas, propondo aumento da capacidade destas, seja pela expansão das existentes ou construção de novos prédios, ou pela ativação de espaços inutilizados, ou pela contratação de novos professores. Por outro lado, escolas com excesso de capacidade podem ter seus recursos realocados a outras áreas adjacentes, para que haja equilíbrio entre a oferta e demanda.

Dutra (1998) estudou a distribuição espacial da rede escolar em São Carlos, São Paulo. O estudo levou em consideração os custos de deslocamentos, em função das distâncias percorridas pelos estudantes. Neste trabalho, foi proposta uma análise comparativa das mudanças nos deslocamentos dos alunos, decorrentes de uma reorganização escolar, segundo a qual foram separados os alunos do ensino fundamental dos demais níveis. Após a reorganização, a demanda de cerca de 12.000 alunos, que antes era atendida por 29 escolas, seria atendida por 18 escolas. O estudo efetuado mostrou que a distância média dos deslocamentos aumentaria em cerca de 20% depois da reforma, o que comprova que a reorganização foi feita sem critérios confiáveis, do ponto de vista de transportes.

Dobrusky (2003), fez um estudo sobre a distribuição de produtos farmacêuticos na Argentina. O autor trata da melhor localização para centros de c*ross docking*, levando em consideração a existência de um pólo central em Buenos Aires, a partir do qual os produtos são distribuídos a outras cidades, localizadas a grandes distâncias. A função do centro de c*ross docking* é, a partir da carga consolidada, advinda do pólo central, realizar o parcelamento das cargas e sua distribuição, por meio de caminhões de pequeno porte. É tipicamente um problema de transportes no qual se deseja minimizar os custos totais de

distribuição. As principais questões do trabalho são: determinar a quantidade de centros de cross docking, suas localizações, capacidades, quais pontos de demanda serão supridos por cada centro de cross docking, e ainda quais pontos de demanda serão supridos diretamente do pólo central. Para a realização do estudo, o autor desenvolveu dois modelos: (1) modelo heurístico de localização-alocação, que não considerou a capacidade dos centros de cross docking como restrição, e (2) modelo de localização exato e capacitado, abordando as demandas dos cliente e definindo as localizações ótimas dos centros de cross docking e suas respectivas capacidades. A solução dos modelos gerou reduções de 5% com relação à prática adotada, baseada em intuições e outros critérios externos, sem um planejamento efetivo.

Vallim Filho (2004) estuda a localização de centros de distribuição de carga (CD's), com o objetivo de minimizar custos logísticos, a partir de duas fases de modelagem. Na primeira fase, fez-se o estudo de localização de CD's, levando em consideração os custos de transporte e de instalação. Esta fase é ainda dividida em dois estágios: um primeiro, no qual é aplicada uma heurística de *clusterização*, que visa agregar os nós de demanda em *clusters* em função do nível de serviço desejado; e um segundo estágio, que utiliza uma heurística de seleção dos melhores candidatos. Entre estes candidatos, definem-se as localizações ótimas, através de um modelo de Programação Linear Inteira Mista ou pela heurística *Simmulated Annealing*. Na segunda fase, o autor propõe o estudo de quantificação de CD's, na qual são feitas as modelagens de custos de estoque, armazenagem e movimentação de materiais e ainda os custos de vendas perdidas, na qual alguns modelos seguem tendências não-lineares. O custo logístico global é representado pela consolidação dos custos mínimos das duas fases. O modelo foi aplicado a um caso real com pouco mais de duzentos pontos de demanda, apresentando algumas contribuições à modelagem matemática para os problemas de localização de instalações.

Silva (2004) estudou o problema de localização de terminais de consolidação de carga parcelada no Brasil. O principal objetivo foi resolver o problema da localização simultânea de um número selecionado de instalações, suas localizações e respectivas áreas geográficas de atuação, por meio de um modelo de programação inteira com função objetivo não-linear e restrições lineares, a fim de minimizar a soma dos custos variáveis de transporte e o custo fixo de instalações. A rede de distribuição foi modelada como sendo do tipo *hub-and-spoke*, em que o tráfego entre dois pontos quaisquer (*spokes*) é sempre feito via terminais de consolidação (*hubs*). A modelagem resultou em um problema não-polinomial dificil (*NP-hard*), ao qual foi aplicada uma estratégia heurística baseada em Algoritmos Genéticos, que

foi testada em alguns problemas bem conhecidos na literatura, utilizados como *benchmark*. Foi conduzido um estudo de caso real, no qual a metodologia se mostrou eficiente para a solução do problema proposto, apresentando uma nova configuração da rede que minimiza o custo total do transporte em 27% ao se comparar com a configuração da rede utilizada.

Silva e Oliveira Filho (2005) fizeram um trabalho abordando o problema de localização de facilidades capacitado para distribuição de gás natural em cidades da região Norte e Nordeste do Brasil, com custos lineares de transporte e custos fixos de instalação. Segundo os autores, foram usados métodos simples, práticos e computacionalmente baratos para instalar as facilidades, resolvendo, em seguida, o problema de transporte associado às facilidades instaladas. Inicialmente, o problema do transporte foi aplicado segundo um método exato, porém foi constatado que o método, por possuir um algoritmo complexo e recursivo, não funcionou bem para problemas de médio e grande porte, uma vez que a memória computacional disponível não foi suficiente. Assim, os autores desenvolveram uma heurística para resolver o problema do transporte. O método foi aplicado a problemas testes encontrados na literatura e a um caso específico. Foi observada a viabilidade prática do método, uma vez que o mesmo se demonstrou bastante rápido, tendo aproximadamente 2 segundos de tempo médio para apresentação da solução, e o tempo máximo restrito a 6 segundos.

Brito et al. (2005) desenvolveram três algoritmos baseados nos conceitos das metaheurísticas Greedy Randomized Adaptive Search Procedure, Variable Neighborhood Search e Genetic Algorithms para a localização de estações de rádio base, na expectativa de se obter soluções viáveis e de boa qualidade, para instâncias de porte razoável. O trabalho consiste em selecionar os locais de custo mínimo, observando as condições de cobertura da área em estudo, atendimento da demanda e uma exploração eficiente do espectro de freqüências. Este trabalho é um ponto chave no planejamento e desenvolvimento de redes de telefonia celular. Quanto menor o número de estações instaladas, menor será o custo. Por outro lado, o atendimento da demanda e a qualidade do serviço podem ser prejudicados. Os autores compararam os resultados computacionais obtidos na aplicação dos três algoritmos e, por meio de comparações e estatísticas, concluíram que o algoritmo GRASP obteve o melhor desempenho para as instâncias consideradas naquele trabalho. Certamente, tais propostas de abordagem heurística para o problema podem ser ainda desenvolvidas, tornando os algoritmos mais sofisticados, constituindo uma abordagem alternativa aos algoritmos exatos existentes.

Pires (2006) fez um estudo de escolha de localização para uma rede de distribuição de carga fracionada e capacitada, com restrições de cobertura e de atendimentos mínimos e

máximos em cada central, presente no estado de São Paulo. O principal objetivo é a minimização de custos de transporte, relacionados à transferência e distribuição de produtos, a fim de determinar quais cidades, dentre um conjunto de candidatas, devem atuar como desconsolidação de carga. Os candidatos à localização são as cidades que possuem representantes locais capacitados à realização da distribuição regional, e os critérios para definição de um local candidato se relacionam à posição geográfica do município, facilidade de acesso através das rodovias, presença de aeroportos, nível de demanda, entre outros. Para realizar o estudo, utilizou-se de um modelo de programação linear inteira, que oferece a solução ótima para a simulação, e também foi implementada a metaheurística Busca Tabu, utilizada para modelos não lineares ou com um maior número de variáveis e restrições. Estas metodologias foram aplicadas a cenários de um problema real, dentro do nível de decisão gerencial, em um horizonte de planejamento de médio prazo, tendo sido consideradas satisfatórias, tanto do ponto de vista dos resultados, quanto da viabilidade das soluções encontradas.

Após estes exemplos de aplicações em problemas de localização, no próximo capítulo serão apresentados estudos a respeito dos Sistemas de Informações Geográficas e suas potencialidades como um sistema de apoio à decisão espacial, dando ênfase a aplicações em problemas de localização de instalações, vindo a complementar e integrar os conceitos apresentados no presente capítulo.

3 Sistemas de Informações Geográficas

Este capítulo apresenta os conceitos que envolvem os Sistemas de Informações Geográficas (SIG). São indicados os componentes de um SIG e suas duas principais formas de representação de dados em mapas: raster e vetorial. Discute-se a importância do SIG no contexto de um sistema de apoio à decisão espacial. Na seqüência, apresenta-se a classe de Sistemas de Informações Geográficas com aplicações em transporte e logística (SIG-T), sendo identificadas as técnicas de integração entre SIG-T e modelos de localização. Por fim, são elucidadas algumas aplicações práticas de SIG em estudos de localização.

Thill (2000) aponta as origens dos SIG em iniciativas de pesquisas iniciadas nos Estados Unidos, Canadá e Europa durante a década de 1950. Segundo Fleury *et al.* (2000), a idéia inicial de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), ou do inglês *Geographic Information Systems* (GIS), nasceu na Suécia. Entretanto, o primeiro SIG foi desenvolvido no Canadá, em 1962, então denominado *Canada Geographic Information System*, desenvolvido pelo *Canada Land Inventory*, tendo por objetivo a realização de inventários de terras em âmbito nacional, o qual envolvia diferentes aspectos sócio-econômicos e ambientais. Entretanto, o SIG só se tornou totalmente aplicável na década de 70, experimentado rápido crescimento na década de 80, com o advento de novas tecnologias de informação. Segundo Lima (2003), ao longo da década de 90 até os dias atuais tem havido um vasto e crescente interesse em SIG no mundo acadêmico, nas empresas de *software* e entre profissionais liberais, como conseqüência do aumento da capacidade de processamento, da redução dos custos dos microcomputadores e do aumento da disponibilidade de bases de dados cartográficos digitais. No Brasil, as aplicações iniciais desse sistema foram nos setores ambiental e de energia, segundo Rose (2001).

Antes do advento dos SIG, a análise e manutenção de entidades em um contexto espaçotemporal eram executadas de forma analógica, onde o processamento e a apresentação dos
dados eram feitos através de mapas e cartas, formas mais antigas e ainda mais comuns.

Porém, a produção de mapas é um processo oneroso, cujos elementos, em geral, são
armazenados de forma georeferenciada segundo um sistema de coordenadas (latitude,
longitude e elevação em relação ao nível do mar). Com a sobreposição de mapas em folhas
transparentes torna-se possível fazer uma correlação desses dados. Com o aparecimento dos

SIG, foi possível diminuir gastos com essa produção, armazenamento e atualização manuais de mapas. Um SIG armazena a geometria e os atributos dos dados que estão georeferenciados, ou seja, localizados na superfície terrestre e representados numa projeção cartográfica. Os SIG são considerados, atualmente, como a melhor ferramenta para organizar dados em modelos espaciais (DUTRA, 1998).

Segundo Carrara *et al.* (2006), Church (2002) Rose (2001) e Fleury *et al.* (2000) os Sistemas de Informações Geográficas podem ser definidos como uma coleção organizada de *hardware*, *software*, pessoal qualificado e dados geográficos, com o objetivo de gerenciar banco de dados, efetuando operações de inserção, armazenagem, manipulação, remoção, atualização, análise e visualização de dados, tanto espaciais como não-espaciais (dados de atributos), funcionando como uma valiosa ferramenta em estudos de planejamento e gerenciamento. Ver o SIG como somente um *software* ou sistema de *hardware* é perder de vista o papel crucial que ele pode desempenhar, em um processo amplo de tomada de decisão.

Não diferente dos outros autores, Lima e Rangel (2002) definem os SIG's como sistemas que realizam tratamento computacional de dados geográficos e recuperam essas informações em uma base de dados, seja através de dados alfanuméricos ou de aspectos espaciais como coordenadas. Eastman (1998) define um SIG como um sistema auxiliado por computador para a aquisição, armanezamento, análise e visualização de dados geográficos. Em geral, a maioria dos pesquisadores converge suas opiniões ao estabelecer o conceito de SIG, constituindo definições complementares, e não excludentes.

No ambiente de um SIG, as entidades do mundo real podem ser didaticamente descritas por dados espaciais ou de atributos. A manipulação destes dados com o objetivo de extrair informações é denominada análise geográfica. O registro dos atributos pode ser feito de acordo com várias escalas ou níveis de medidas, dependendo do grau de refinamento que se queira dar à descrição do objeto de estudo. Conceitualmente pode-se dividir as operações de análise geográfica em três grupos:

- Operações de manipulação: usadas, por exemplo, para classificar tematicamente um atributo em função do seu valor em cada posição, ou combinar atributos diferentes com o objetivo de encontrar alguma correlação espacial entre eles.
- Operações de consulta espacial: usadas, por exemplo, para recuperar de um banco de dados um conjunto de dados que satisfaça a uma condição definida pelo usuário. O

resultado de uma operação de consulta pode ser posteriormente manipulado ou simplesmente visualizado através de uma operação de apresentação.

 Operações de apresentação: usadas para controlar as possíveis formas de visualização dos resultados das operações de manipulação ou de consulta, geralmente apresentadas em forma de mapas.

A tecnologia SIG tem tido enorme impacto em praticamente todos os campos que gerenciam e analisam dados geograficamente distribuídos. No contexto da logística, várias empresas, nos setores público e privado, baseiam suas decisões de planejamento de transportes em SIG, utilizando suas potencialidades com relação a ferramentas de gerenciamento, armazenamento e processamento de dados. Conforme Rorato (2003), a aplicação de um SIG é observada em diversos campos, tais como: ambiental, florestal, planejamento urbano, geografía, agronomia, engenharia, processamento de dados, pesquisa operacional, arquitetura e urbanismo, gerenciamento de serviços, engenharia de transportes, entre outros.

De acordo com Church (2002), seis fatores inter-relacionados se destacam como principais no crescimento das empresas de desenvolvimento de *softwares* SIG: (1) existe uma gama de *softwares* SIG disponibilizados a partir de vendedores comerciais e universidades; (2) aumento da capacidade dos computadores em armazenar e recuperar grandes quantidades de dados, em tempos e custos razoáveis; (3) impressoras gráficas estão mais sofisticadas e rápidas, produzindo saídas de alta resolução e qualidade; (4) uma maior disponibilidade de dados geográficos a partir de empresas privadas e agências governamentais, a custos acessíveis; (5) a expansão do uso do sensoriamento remoto, o que requer sistemas capazes de lidar com largas quantidades de dados; (6) o surgimento do GPS (*Global Positioning System*), que facilitou a coleta de dados espaciais, a custos relativamente baixos e alta precisão.

Atualmente, esforços estão sendo aplicados para a integração de *softwares* SIG à Internet, na busca de sintetizar e integrar dados georeferenciados. A tarefa principal do acesso e transmissão de dados é prover acesso e retorno de informações espaciais. Os SIG-WEB devem ser ferramentas SIG especiais, pois utilizam a Internet como meio de acessar e transmitir dados remotos, realizar análises e fazer apresentações SIG, permitindo que usuários da Internet tenham acesso a aplicações SIG, disponibilizada em servidores remotos na rede. Esses sistemas permitem aos usuários interagirem via Internet, como por exemplo, em projetos de localização de instalações, na manipulação, visualização e análise de múltiplos

conjuntos de dados e na execução de aplicativos comerciais ou no serviço de dados especializados. Segundo os mesmos autores, para a total difusão deste conceito, muitos pontos ainda precisam ser aprimorados (PESSE & GALVÃO, 2003).

3.1 Componentes de um SIG

Para se ter um verdadeiro SIG, alguns elementos essenciais de *software* são citados em Eastman (1998), dentre eles: banco de dados espacial e de atributos, sistema de visualização gráfica, sistema de digitalização de mapas, sistema de gerenciamento de banco de dados, sistema de análise geográfica, sistema de processamento de imagens, sistema de análise estatística, e sistema de apoio à decisão. Nem todos os sistemas têm todos esses elementos, mas para ser um verdadeiro SIG, um grupo essencial deve estar presente. Estes elementos se encontram esquematizados na Figura 3.1.

O banco de dados espacial e de atributos é o centro do sistema, composto por uma coleção de mapas e informações digitais associadas. A capacidade de um SIG habilita a interação entre diversos tipos de informações, provenientes de diferentes fontes. O principal elemento da integração de informações através de um SIG é a ligação que se faz entre dados espaciais, ou geográficos, a dados não-espaciais, ou dados de atributos. Os dados espaciais são a representação de objetos sob três formas básicas: pontos, linhas e áreas. Os atributos são necessários para completar com informações não-espaciais cada objeto espacial e, normalmente, são armazenados na forma de tabelas, com informações alfanuméricas quantitativas e qualitativas. Por exemplo, um ponto pode representar a interseção (nó) de duas vias (arcos), e os atributos são informações, como a presença, ou não, de uma fábrica, cliente ou depósito neste ponto. No caso de uma fábrica, atributos como a quantidade produzida, a frota de veículos, o número de funcionários, custos, entre outros, podem e devem estar associados (NARUO, 2003).

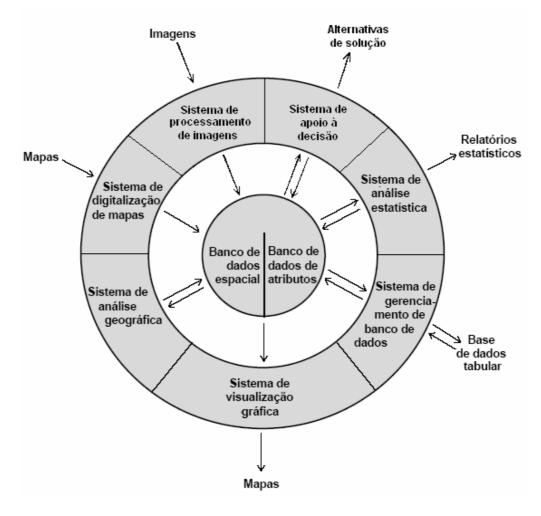


Figura 3.1 – Componentes de um SIG Fonte: Adaptado de Eastman (1998)

Uma vez definido o banco de dados central, existe uma série de sistemas que auxiliam as operações a serem realizadas. O sistema de visualização gráfica, por exemplo, permite, a partir de elementos selecionados da base de dados, produzir mapas de saídas na tela do computador ou em algum dispositivo de impressão. Como dispositivo de entrada, tem-se o sistema de digitalização de mapas, que permite converter mapas existentes em folhas de papel para a forma digital, criando ou aprimorando ainda mais o banco de dados.

O sistema de gerenciamento de banco de dados é normalmente utilizado para entrada, gerenciamento e análise de dados de atributo e espacial. Com este sistema, é possível introduzir dados de atributo, como informações tabular e estatística e, subseqüentemente, extrair tabulações especializadas e sumários estatísticos para gerar novos relatórios. A análise destes dados de atributos é a principal vantagem do sistema SIG de gerenciamento de banco de dados, no qual o produto final é certamente espacial, mas a análise em si não possui qualidades espaciais.

O sistema de análise geográfica possibilita analisar dados baseados em sua posição geográfica, vindo a incrementar o sistema de gerenciamento de banco de dados, que funcionam enquanto tratam de atributos associados às mesmas camadas (ou feições). O sistema de análise geográfica possibilita comparar feições diferentes baseadas em uma ocorrência espacial comum. Esta análise é realizada através do processo de sobreposição ("overlay"), assim denominado pela semelhança à sobreposição, em mapas transparentes, dos dois tipos de entidades. O sistema de análise geográfica é o componente geográfico distinto que dá ao SIG sua verdadeira identidade.

O sistema de processamento de imagens inclui a possibilidade de analisar imagens de sensoriamento remoto e convertê-las em dados interpretados na forma de mapa, além de fornecerem análises estatísticas específicas. O sistema de análise estatística visa oferecer um tratamento estatístico para a descrição de dados espaciais. Estes dois sistemas não estão necessariamente presentes em todos os *softwares* SIG. Em contrapartida, o sistema de apoio à decisão é uma das mais importantes funções do SIG. Usado em conjunto com outros componentes do sistema, este módulo oferece uma ferramenta poderosa para os tomadores de decisão no momento de suas escolhas, que poderá se efetuada com base em diferentes alternativas geradas pelo sistema.

A Figura 3.2 exemplifica o uso do SIG para organizar informações sobre uma determinada região em um conjunto de mapas, cada um deles exibindo uma informação a respeito de uma característica desta região. No caso, um conjunto de mapas é obtido para auxiliar o planejamento de transporte urbano entre pontos de oferta e de demanda. Cada um destes mapas temáticos é referenciado individualmente como uma camada (ou *layer*). Cada camada é cuidadosamente sobreposta de forma que toda localização seja precisamente ajustada às localizações correspondentes em todos os outros mapas. A camada inferior deste diagrama é a mais importante, porque representa um sistema de referências (latitudes e longitudes) ao qual todos os mapas serão precisamente referenciados.

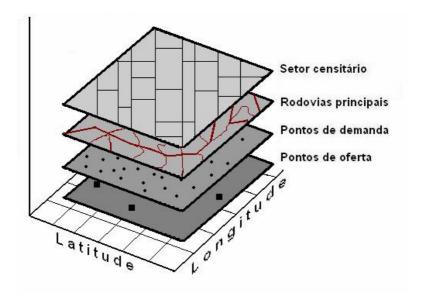


Figura 3.2 – Integração de camadas em SIG

Uma vez que estes mapas foram cuidadosamente referenciados dentro de um mesmo sistema locacional de referência, informações exibidas nas diferentes camadas podem ser comparadas e analisadas em combinação. Nem todas as análises demandarão o uso de todas as camadas de mapas simultaneamente. Em alguns casos, um investigador usará seletivamente a informação para considerar relações entre camadas específicas. Além disso, informação de duas ou mais camadas poderia ser combinada e então transformada em uma nova camada singular para uso em análises subseqüentes. A habilidade em separar informação em camadas, e então combiná-las com outras é a razão pela qual o SIG oferece tão grande potencial como ferramenta de pesquisa e apoio à tomada de decisão.

Conforme Hoffmann e Gómez (2003), diversas técnicas para coleta, tratamento, manipulação, análise e apresentação de dados espaciais foram desenvolvidas, baseadas em conceitos de cartografia, ou seja, informações pertinentes a mapas. O termo geoprocessamento resume todas essas tecnologias, e denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica. No processo de modelagem de um Sistema de Informação Geográfica, o entendimento das tecnologias pertencentes ao geoprocessamento faz-se necessário, sendo a principal delas a análise de dados espaciais.

Dutra (1998) cita a arquitetura de um *software* SIG através dos elementos: estabelecimento de interface com o usuário, mantida por linguagem de comandos; integração de dados; funções de geoprocessamento, que são dependentes dos tipos de dados; ambiente de

visualização, que é consequência da interface; e banco de dados geográficos, a partir do qual os dados de um SIG são geralmente armazenados ou recuperados. A integração de dados pode-se dar de quatro formas principais: entrada de dados via caderneta de campo, via digitalização em mesa, através da digitalização ótica feita a partir de mapas existentes, e pela leitura de dados na forma digital, incluindo, ainda, a importação de dados em outros formatos. Segundo a mesma autora, no Brasil, as principais fontes de dados geográficos são oriundas do Instituto Brasileiro de Geografía e Estatística (IBGE), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e do Centro de Cartografía Automatizada do Exército (CCAE). Além, disto, com o Sistema de Posicionamento Global (GPS – *Global Positioning System*), tornou-se possível a realização de trabalhos de campo com alto grau de precisão e com registro digital direto.

A complexidade funcional de *softwares* SIG é o que o define como um sistema diferente de qualquer outro sistema exclusivo de gerenciamento de banco de dados. Sem a capacidade de visualização geográfica, o SIG seria meramente um sistema de gerenciamento de banco de dados, dotado de algum poder para extrair relações significativas entre entidades de dados. Sem a capacidade analítica, os SIG seriam reduzidos a uma aplicação de mapeamento automatizada. Sem as características de gerenciamento de banco de dados, os SIG seriam incapazes de capturar relações topológicas e espaciais entre entidades de dados georeferenciados, se estas relações não já estivessem pré-definidas (THIL, 2000). Os SIG são relacionados a outras aplicações de banco de dados, mas com uma diferença importante: toda a informação em um SIG é vinculada a um sistema de referência espacial. Outras bases de dados podem conter informação geográfica (como endereços de rua ou códigos de endereçamento postal), mas uma base de dados de SIG usa o georeferenciamento como o meio primário de armazenar e acessar a informação.

Conforme já mencionado, com o advento dos SIG tornou-se possível realizar análises e pesquisas apoiadas na distribuição espacial das informações. Mas, para alimentar corretamente um SIG, é necessário transformar as referências espaciais alfanuméricas em posições geográficas concretas, representáveis geograficamente. Como conseqüência, para um nível de planejamento municipal, o endereço de correspondência se tornou a forma de referência espacial mais encontrada nos SIG. É também a forma de localização mais utilizada pela população, tornando-se a chave de acesso mais adequada para armazenar e recuperar informações espaciais em um SIG urbano. No entanto, a falta de um cadastro de endereços

consistente, padronizado e atualizado é um sério problema no contexto brasileiro, dificultando as pesquisas em planejamento urbano que utilizam o georeferenciamento (LIMA, 2003).

3.2 Representação de dados em mapas

Um Sistema de Informação Geográfica trabalha basicamente com dois tipos de informações: dados espaciais e alfanuméricos (de atributos). A maior preocupação consiste na maneira como armazenar os dados espaciais em forma digital. A partir do momento que o mundo real é complexo, seriam necessárias bases de dados infinitamente grandes para capturar o mundo real precisamente. Portanto, os dados precisam ser generalizados ou sofrerem uma abstração para reduzi-los a uma quantidade manuseável. Os dados devem ser representados como um conjunto de objetos finitos. Para tanto, conforme Church (2002), os sistemas utilizam-se de uma ou a combinação das duas técnicas fundamentais de modelo de dados: modelo vetorial e modelo matricial (ou raster). A representação destes dois modelos pode ser visto na Figura 3.3.

O modelo vetorial representa informações com as coordenadas exatas de sua localização. Para tanto, as feições geográficas (rios, estradas, terrenos) são codificadas em um sistema de coordenadas cartesianas (x,y) utilizando componentes básicos: pontos, linhas e áreas. As áreas no modelo vetorial são definidas a partir de uma seqüência de vetores, onde cada vetor começa onde o anterior termina, de forma a fechar o polígono (CHURCH, 2002).

Ainda segundo o mesmo autor, o modelo raster divide a área em estudo em células de uma matriz dividida regularmente. A localização de objetos geográficos é definida pela posição nas linhas e colunas dessa matriz. Cada célula terá um valor correspondente ao tema mais freqüente naquela localização espacial, registrando assim, a condição ou atributo da superfície terrestre daquele ponto. Um conjunto de células e seus valores associados formam uma camada, e uma base de dados tipicamente contêm várias camadas (como cobertura terrestre, elevação, tipo do solo etc).

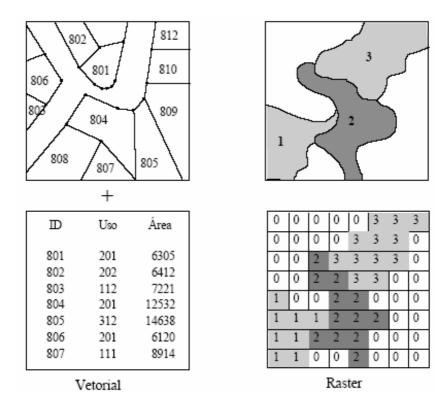


Figura 3.3 – Representação de dados nos formatos vetorial e matricial Fonte: Eastman (1998)

O uso de um modelo específico dependerá da intenção de uso, da forma como os dados são coletados e do custo associado a cada modelo. Eastman (1998) aponta os pontos fortes dos modelos raster e vetoriais. Segundo este autor, modelos raster são tipicamente intensos em dados, uma vez que estes precisam registrar dados em cada posição de célula. Entretanto, a vantagem é que o espaço geográfico é uniformemente definido de forma simples e previsível. Como resultado, o modelo raster tem maior poder analítico do que os modelos vetoriais na análise de espaços contínuos, e são mais aptos para o estudo de dados que variam continuamente no espaço. A segunda vantagem de modelos raster é que a sua estrutura se aproxima muito da arquitetura dos computadores digitais, assemelhando-se à concepção de pixels. Modelos raster tendem a ser muito rápidos na avaliação de problemas que envolvem várias combinações matemáticas de dados em múltiplos planos. Adicionalmente, como as imagens de satélite empregam uma estrutura raster, a maioria destes modelos podem facilmente incorporar esses dados, e alguns oferecem plena capacidade de processamento de imagens.

Enquanto modelos raster são predominantemente orientados para a análise, os modelos vetoriais são mais orientados para o gerenciamento de bancos de dados. Modelos vetoriais são muito eficientes no armazenamento de dados de mapas, pois armazenam apenas os limites das

feições e não o que está dentro desses limites. Em função da representação gráfica das feições estar diretamente relacionada ao banco de dados de atributos, os modelos vetoriais geralmente permitem o deslocamento em torno do visualizador gráfico com o mouse e a consulta dos atributos associados à feição visualizada, tais como a distância entre pontos ou ao longo de linhas, as áreas de regiões definidas na tela e assim por diante. Além disso, eles podem produzir mapas temáticos simples de consultas a banco de dados. Comparado com seu similar raster, os sistemas vetoriais não têm uma ampla gama de funções para análise sobre um espaço contínuo. Eles levam vantagem, entretanto, em problemas que envolvem movimentos sobre uma rede, e podem empreender a mais fundamental das operações de SIG, ou seja, os sistemas vetoriais podem chegar mais próximo à organização do banco de dados geográficos de forma simular a uma coleção de mapas, como apresentado na Figura 3.2. A simples função de gerenciamento de banco de dados e as excelentes possibilidades de mapeamento tornam os modelos vetoriais mais atraentes. Modelos vetoriais são freqüentemente usados para representar objetos geográficos, como redes de transportes e áreas do senso (EASTMAN, 1998).

A utilização de cada modelo de dados varia basicamente em relação ao tipo de dado ou à sua aplicação. Conforme Church (2002), o uso de cada modelo depende basicamente de cinco fatores: (1) a forma como os dados são coletados ou adquiridos; (2) o tipo de análise e modelo para os quais os dados são aplicados; (3) o custo do *software* SIG e entrada de dados; (4) o tipo do equipamento necessário para suportar o SIG; e (5) o tipo de pessoal responsável pelo gerenciamento do sistema. Modelos raster tendem a ser mais baratos e são designados para aplicações em problemas ambientais. Ao contrário dos modelos vetoriais, os modelos raster não são capazes de representar estruturas em redes adequadamente. Selecionar um SIG específico para as necessidades planejadas é uma tarefa complicada, devendo ser bem detalhada. Os custos do *software*, de operação, manutenção e de pessoal podem ser substanciais.

3.3 O SIG como um Sistema de Apoio à Decisão Espacial

No leque das definições de SIG apresentadas, são colocadas ênfases diferentes em vários aspectos do SIG, principalmente em suas características essenciais de referência

espacial e análise de dados. Porém, algumas deixam de citar o verdadeiro poder do SIG, sua habilidade em integrar informações e ajudar no processo de tomada de decisões.

Segundo Lima e Rangel (2002), a tecnologia de Apoio à Decisão consiste em analisar, através de modelos matemáticos, problemas gerenciais de grande porte, e fornecer resultados que auxiliem a tomada de decisões relacionadas ao problema. Uma etapa mais avançada seria a transformação de um SIG em um SADE (Sistema de Apoio à Decisão Espacial), que seria um SAD (Sistema de Apoio à Decisão) a ser usado para apoiar os tomadores de decisão em diversos níveis e tipos de atuação, e que enfocam dados espaciais. Em geral, um SADE contém todos os componentes de um SAD, adicionando ao mesmo a capacidade de armazenar e manipular dados espaciais, normalmente no contexto SIG. Pode ser visto como uma coleção integrada de *software*, dados e procedimentos para apoiar o processo de tomada de decisões. Os componentes básicos de um SADE se assemelham aos componentes de um SIG (PESSE & GALVÃO, 2003).

Conforme Arakaki e Lorena (2006), a combinação das funções de visualização e análise espacial de um SIG e um modelo de localização-alocação fornecerão uma poderosa ferramenta para suporte à decisão espacial. Lima (2003) dá especial ênfase ao papel do SIG no apoio à decisão e ao planejamento, que vem ganhando atenção ao longo dos últimos anos, em conseqüência de sua capacidade de associar atributos das entidades analisadas à sua localização espacial, bem como de servir como plataforma para a utilização de diversas técnicas e ferramentas. Os conceitos de SADE têm sido introduzidos nos SIG para mudar o foco da informação para o processo de decisão e aumentar as propriedades de interação dos sistemas e suas habilidades de adaptação ao processo de tomada de decisões.

Além de suportar uma base de dados espaciais, os SIG têm a capacidade de transformálas em novas informações. Uma boa decisão depende de uma análise cuidadosa de uma
grande quantidade de informações. Neste contexto, decisões empíricas e sem critérios não têm
mais lugar no mercado atual. Com o objetivo de auxiliar na análise de informações espaciais e
opinar sobre uma decisão, propõe-se o uso de um SADE capaz de fornecer, graças à evolução
dos computadores com alta capacidade de processamento e preços acessíveis, "sugestões"
cada vez melhores sobre problemas cada vez maiores, cooperando para a tomada de decisões
rápidas e eficientes. Kliskey (1995) aponta a importância da informação no contexto da gestão
estratégica, por ter o poder de reduzir as incertezas e auxiliar no processo de tomada de
decisões, conforme ilustra a Figura 3.4.

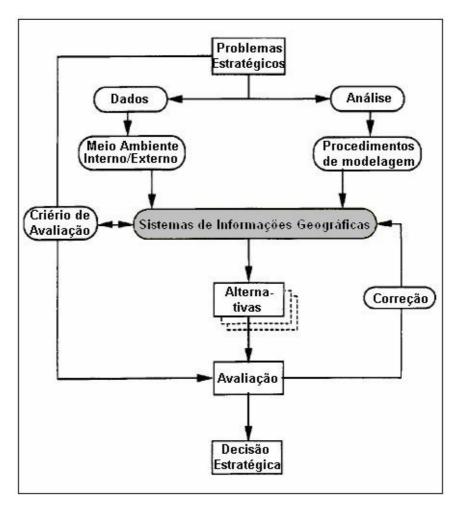


Figura 3.4 – Posicionamento do SIG no processo de planejamento Fonte: Adaptado de Kliskey (1995)

Dentro deste contexto os SIG podem ser inseridos como um SADE, pois provêem um conjunto de espaços de soluções, baseados em diferentes alternativas de cenários, a partir das quais se podem avaliar e/ou corrigir critérios pré-definidos, como objetivos, restrições e parâmetros do modelo, e com isto permitir aos tomadores de decisões que façam suas escolhas com base nas melhores opções (YEH & CHOW, 1996). Fica claro que um SIG é apenas uma ferramenta, e como tal tem a função de auxiliar o processo de tomada de decisão, e não tomar a decisão por si só. A informação espacial, ou geográfica, aplicada à gestão estratégica, provê uma base geográfica referenciada e representações gráficas. Sua importância está na análise de informações relevantes, como, por exemplo, a melhor localização para um conjunto de instalações. Segundo Thill (2000) o SIG se posiciona como a última tecnologia de integração de informação espacial.

O processo de apoio à decisão é enriquecido pela participação dos intervenientes e pela aquisição de conhecimentos que ocorrem ao longo do processo. Dentro deste contexto, é

oportuno enfatizar que o apoio à decisão não substitui a tomada de decisão. Muito pelo contrário, ambos são fundamentais e complementares em um processo decisório. O apoio à decisão não deve ser visto como uma atitude restrita à ajuda do entendimento de um problema, mas ter como objetivo fornecer as informações sobre as questões que surgem durante todo o estado de desenvolvimento do processo decisório. Este processo deve, principalmente, orientar o decisor com relação àquelas oportunidades que mais atendem às suas expectativas e apoiá-lo para que este tome decisões conscientes e fundamentadas. Assim, a tomada de decisão, exclusividade do decisor, incorpora um elevado grau de subjetividade por ser, basicamente, baseada nos juízos de valores do decisor (LIMA *et al.*, 2004).

Estes mesmos autores concluem que a atividade de apoio à decisão se faz fundamental nas várias etapas do processo decisório, que pode ser apresentada em três fases: Estruturação, Avaliação e Recomendação. Na fase de Estruturação, essa atividade se insere no processo com o objetivo de construir uma estrutura consensualmente aceita pelos decisores, não de modelagem de uma realidade pré-existente, mas de geração e construção de conhecimentos. Na fase de Avaliação, o processo de apoio à decisão segue uma conduta de interação, construção e aprendizagem com o desenvolvimento de um modelo para avaliação das ações, segundo os juízos de valor dos decisores. Essa atividade não busca uma "solução ótima", mas sim, uma "solução de melhor compromisso". E, finalmente, na fase de Recomendação, esta atividade procura fornecer subsídios aos decisores através de ferramentas (conceitos, modelos e procedimentos), para que esses tenham condições de analisar e escolher qual a estratégia mais adequada a ser adotada em cada cenário em estudo.

Lima (2003) já havia classificado os SIG e suas ferramentas de apoio à decisão espacial segundo uma análise no contexto do processo decisório, estruturado também em três fases principais, complementares às fases definidas por Lima *et al.* (2004), contextualizando-as ao SIG: Inteligência, Projeto e Escolha. A fase de Inteligência, similar à fase de Estruturação, é aquela em que os dados brutos são obtidos, processados e examinados a fim de se identificar oportunidades e problemas. Para converter a situação de decisão do mundo real em bases de dados dos SIG são utilizados as funções de aquisição, armazenagem, recuperação e gerenciamento de dados e informações espaciais. Os SIG podem ainda apresentar as informações de forma abrangente aos tomadores de decisão, utilizando-se de mapas ao invés de várias páginas de tabelas de um relatório.

A fase de Projeto, paralela à fase de Avaliação, envolve o levantamento, desenvolvimento e análise de uma série de possíveis soluções para o problema, utilizando-se

de um modelo formal. Este modelo é a simplificação da realidade, representando os aspectos relevantes de decisão na base de dados do SIG. A habilidade dos SIG para gerar uma série de alternativas de decisão está baseada principalmente em suas operações fundamentais de conectividade, contigüidade, proximidade e sobreposição.

Na fase de Escolha, similar à fase de Recomendação, cada alternativa gerada na fase e projeto é avaliada e comparada às outras segundo regras de decisão específicas, utilizadas para impor uma hierarquia às alternativas sob análise, segundo preferências do decisor. Porém, esta capacidade de incorporar as preferências do decisor no processo decisório é um fator crítico para o uso do SIG na fase de escolha. Esta restrição faz do SIG uma ferramenta estática no contexto do processo decisório, reduzindo seu alcance como ferramenta de apoio à decisão. Segundo Lima (2003), um modo de fazer com que o SIG esteja além de uma ferramenta de suporte à decisão, é por meio da incorporação de alguma técnica ao SIG, como, por exemplo, técnicas de Análise de Decisão Multicritério no processo decisório. Enquanto o SIG pode ajudar como ferramenta no tratamento das descontinuidades dos dados, provendo mais e melhores informações, as técnicas de análises de decisão podem ajudar, administrando as divergências entre as partes de interesse conflitante.

3.4 Sistemas de Informações Geográficas com aplicações em Transportes (SIG-T)

Segundo Thill (2000) o uso disseminado de Sistemas de Informações Geográficas com aplicações na gestão de transportes ocorreu a partir de 1980. Devido aos requisitos específicos para aplicações em transportes e à recente adoção desta tecnologia de informação na área do transporte, pesquisadores aumentaram seus esforços para aprimorar a abordagem existente de SIG, de forma a capacitá-lo à aplicação em estudos de transportes.

Hoje em dia, dispõem-se no mercado de um número razoável de *softwares* de Sistemas de Informações Geográficas com aplicações no planejamento e gerenciamento de transportes, os denominados SIG-T. Estes possuem rotinas logísticas de localização de facilidades, roteirização e programação de veículos, aplicações em monitoramento e controle do tráfego, oferta e demanda de transportes, prevenção de acidentes, otimização de rotas, dentre outras. Para atender aos anseios de usuários, que buscam aumentar sua satisfação na utilização de

serviços de transportes, exigindo níveis de qualidade cada vez maiores e, ao mesmo tempo, redução de custos, há uma exigência, em nível crescente, de capacitação de técnicos em transportes e melhores ferramentas que auxiliem os tomadores de decisão, levando a uma procura cada vez mais acentuada pelos SIG-T (ROSE, 2001).

Resumidamente, Dutra (1998) compara os formatos e padrões similares entre um SIG e um SIG-T: os elementos geográficos utilizados em SIG são: pontos, linhas e áreas. Já as informações manejadas nos sistemas com aplicações em transportes se referem aos três elementos espaciais na forma de nós, arcos e zonas. Sendo assim, por apresentarem formatos e padrões similares, os quais permitem sua integração operativa, há a possibilidade de implementação das tecnologias SIG à análise dos sistemas de transportes.

Thill (2000) organiza as funcionalidades de um SIG-T em uma estrutura funcional relacionada ao nível de intensidade de processamento de dados envolvido, identificando três grupos funcionais: (1) gerenciamento de dados, responsável pelo armazenamento e recuperação dos dados; (2) manipulação de dados, referente à criação de novos dados a partir dos dados brutos; e (3) análise de dados ou modelagem analítica. Os requisitos associados a cada um destes grupos são interdependentes. A manipulação de dados requer o armazenamento de dados, e a junção destes dois grupos é necessária para a efetivar a modelagem, sendo requisitos acumulativos. A Figura 3.5 ilustra esta estrutura funcional dos SIG-T.

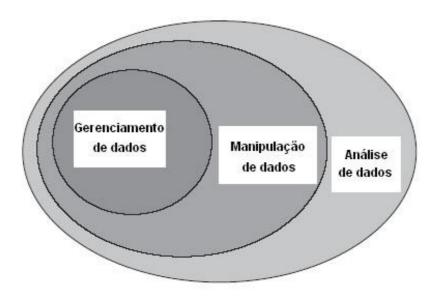


Figura 3.5 – Modelo hierárquico dos grupos funcionais em SIG-T Fonte: Adaptado de Thill (2000)

Segundo Lacerda (1999), softwares SIG-T com aplicações em localização de instalações, em sua maioria, utilizam interfaces gráficas para controlar e variar parâmetros, executar o modelo, inspecionar os resultados e gerar relatórios. Uma outra característica bastante comum é a possibilidade de visualização dos resultados através de mapas, permitindo assim uma análise mais qualitativa dos resultados. Oferecem também capacidade de comunicação com sistemas de bases de dados usualmente utilizados, como os gerenciadores de banco de dados e planilhas eletrônicas, o que facilita o manuseio, preparação e checagem de grandes massas de dados.

As principais vantagens no uso do SIG-T, segundo Rose (2001), são: manter a integridade dos dados, simplificar ou mesmo eliminar operações realizadas de forma manual, proporcionar melhor visualização através de representação gráfica, garantir facilidade na edição da base de dados geográfica, reduzindo custos de armazenagem e atualização dos dados, além de permitir várias outras operações de cálculos manualmente impraticáveis, como, por exemplo, o cálculo de caminhos mínimos entre pontos da rede, utilizando-se de uma camada de malha viária.

Atualmente uma variedade de ferramentas SIG-T está disponível para auxiliar nestas atividades. Entretanto, elas podem diferir significativamente umas das outras, em parte pela maneira como representam e trabalham com dados geográficos, em parte pela ênfase dada às várias operações. Para escolher um *software* SIG-T adequado às condições reais da empresa, o ideal é definir uma ou mais situações para testar os sistemas disponíveis no mercado. Muitas vezes, a empresa constata a inadequação do *software* após tê-lo adquirido, com prejuízos apreciáveis (NOVAES, 2004; ROSE, 2001).

Segundo Novaes (2004), uma meta das empresas fornecedoras de *softwares* SIG com aplicações em transportes é torná-los mais fáceis de serem utilizados pelos usuários. Para isso, é necessário se ter uma representação analítica adequada da rede viária e dispor de uma base de dados geocodificados dos endereços dos clientes. Infelizmente, de acordo com Fleury *et al.* (2000), o uso de SIG, no Brasil, tem como fator limitante, na maioria das vezes, a escassez de bases de dados confiáveis e atualizadas, tanto em relação a dados espaciais (mapas digitalizados), quanto a dados demográficos e sócio-econômicos. Essa situação é muito séria no Brasil, em que pesem os esforços de algumas entidades e empresas, que vêm tentando suplantar tais deficiências. Falta, por parte da administração pública, uma política que incentive e estabeleça regras e responsabilidades no que diz respeito à preparação e disponibilização de bancos de dados confiáveis.

Lacerda (1999) apresentou as principais características desejáveis aos *softwares* SIG-T, com relação a aplicações em estudos de localização, esquematizados no Quadro 3.1.

Capacidade de modelagem	O <i>software</i> deve permitir a modelagem de características específicas de cada situação sob análise.
Metodologia de solução	Os <i>softwares</i> devem possuir algoritmos otimizantes, utilizados preferencialmente em modelos de pequeno porte, e também algoritmos heurísticos, que permitem o tratamento de modelos de maior complexidade, ou mesmo uma combinação entre métodos heurísticos e exatos.
Facilidade no manuseio de dados	Como os problemas de localização reais geralmente envolvem um grande volume de dados, faz-se necessário seu manuseio de forma eficiente. São características desejáveis: a conectividade com sistemas existentes na empresa, a permissão de troca de dados com planilhas eletrônicas e aplicativos de gerenciamento de banco de dados.
Visualização dos resultados	A apresentação dos resultados através de mapas é um excelente instrumento para comunicação dos resultados e análises pelos tomadores de decisão, assim como a possibilidade de geração de mapas temáticos.
Facilidade de utilização	Os <i>softwares</i> devem permitir a realização e comparação de diferentes cenários, de forma relativamente simples ao usuário.

Fonte: Adaptado de Lacerda (1999)

Quadro 3.1 – Principais características de softwares de localização.

3.5 Integração de modelos de localização em SIG

Para se ter um SIG-T, faz-se necessário a integração do *software* SIG a modelos de localização. Church (2002) cita algumas técnicas para esta integração. Um primeiro problema seria o de definição de um nível de escala para que o problema seja representado. Definir se deve haver e qual o nível de agregação dos dados é uma questão relevante para problemas de localização. Uma vez que o SIG pode prover uma base de dados rica e detalhada, a quantidade de dados necessária pode definir modelos e algoritmos de localização. Por exemplo, um SIG pode representar uma área urbana por meio de milhares de pontos e linhas em uma rede de transporte. Para resolver um problema de localização utilizando esta base de dados, a aplicação pode envolver milhares de pontos de demanda e locais candidatos a facilidades. Este tipo de problema pode impedir a aplicação de algoritmos exatos, ordenando o uso de heurísticas. Os resultados do problema são gerados em função da escala ou do nível de agregação dos dados para o qual o modelo está sendo aplicado. Quanto mais precisa é a

escala, maior é a demanda por tempo computacional e processo de solução. Procura-se a definição de uma escala apropriada, que produza soluções satisfatórias em tempos computacionais razoáveis. Se o problema de localização é complexo, envolvendo grandes volumes de dados, então este é um assunto importante a ser explorado.

A propagação de erros, presentes na representação de dados espaciais e seus atributos (como coordenadas dos pontos e quantidade de demanda, por exemplo), constitui também um obstáculo à integração de modelos de localização aos SIG. Estes erros se propagam, afetando a geração dos resultados. Infelizmente, a maioria dos modelos é definida de forma determinística, principalmente para determinação da quantidade demandada por cada cliente e tempo de viagem entre pontos de oferta e demanda, o que, sabidamente, não segue este padrão (CHURCH, 2002).

Grande parte dos modelos desenvolvidos para a localização de facilidades não inclui todas as opções necessárias para a aplicação em diferentes situações. Alguns destes requisitos são importantes e precisam ser desenvolvidos, como, por exemplo, a inclusão de aspectos temporais. Uma área urbana está sempre em desenvolvimento, e novas facilidades precisam ser construídas no local onde esta demanda adicional está surgindo. Outro exemplo seria como adicionar ou modificar, expandindo ou reduzindo as facilidades existentes. A maioria dos algoritmos tem sido testada sobre a suposição de que todas as facilidades existentes são novas, e que não sofrem nenhum tipo de depreciação.

Almeja-se o desenvolvimento de algoritmos e heurísticas capazes de resolver problemas de localização com milhares de nós, de forma relativamente rápida e que conduza a bons resultados. Estes algoritmos devem possuir diferentes objetivos de localização, como maximização de cobertura de atendimento e minimização de custos. Outra questão na formulação da heurística a ser aplicada no modelo de localização diz respeito à sua implementação. A heurística pode ser implementada a partir de uma semente aleatória ou de uma solução inicial previamente gerada.

A interface gráfica a ser apresentada ao usuário final é uma importante decisão a ser tomada pelos planejadores de SIG. De acordo com Church (2002), existem poucos trabalhos científicos que lidam com o projeto de saídas gráficas e a interface dos *softwares* SIG. Uma visualização interessante seria, por exemplo, a adição de animações gráficas aos mapas gerados e a opção de análise de sensibilidade. Por exemplo, ao se mover uma facilidade com o *mouse*, o algoritmo de problema do transporte resolveria novamente qual seria a realocação mais eficiente para a nova instância. Os resultados devem ser gerados rapidamente, de forma

a se atualizar ao mesmo instante da modificação proposta, promovendo um efeito visual representativo.

A maioria das estruturas de dados usadas em SIG não são as mesmas que aquelas desenvolvidas para aplicações em modelos de localização. Em termos computacionais, é importante selecionar a estrutura de dados, facilmente gerada a partir de dados existentes e que suporte de forma eficiente o algoritmo ou heurística desenvolvidos.

3.6 Aplicações práticas de SIG em estudos de localização

Um caso prático de Sistema de Informações Geográficas aplicado ao planejamento de facilidades públicas é apresentado por Yeh e Chow (1996). Os autores propõem uma integração entre modelos heurísticos de localização-alocação e uma ferramenta SIG para prover um espaço de soluções, onde devem estar localizadas áreas para jogos, passeios e lazer em Hong Kong. Os autores concluem, a partir de informações espaciais advindas do SIG, que a região que estava mais bem suprida, inicialmente, de áreas de lazer, era justamente aquela área cujo acesso era mais restrito, uma vez que as áreas se localizavam fora da região de soluções obtidas pelo SIG utilizado.

No trabalho apresentado por Dutra (1998), o foco é definir possíveis arranjos de localização de escolas de ensino fundamental, situadas na cidade de São Carlos, São Paulo. Os custos analisados incluem principalmente os custos de deslocamento entre pontos de demanda (alunos) e oferta (escolas), utilizando-se dos Sistemas de Informações Geográficas como ferramenta capaz de gerar e analisar estes custos. Outros componentes de custos analisados referem-se aos custos de conveniência, de satisfação, e de eficiência do ensino. Foi feita uma comparação dos custos gerados com a legislação vigente antes da reforma escolar, os que se tinham àquela época, e os que se poderiam ter quando da aplicação de um planejamento estratégico proposto pela pesquisa, utilizando tecnologias modernas na escolha de melhores alternativas de localização das escolas. Para se proceder a estas análises, foram criados cenários que permitiram simulações, às quais tinham o objetivo principal de apontar a melhor solução para o sistema, com conseqüente diminuição do custo médio de deslocamento. As principais rotinas do SIG utilizadas foram: modelo de fluxo em redes,

modelos de agrupamento e particionamento e modelo de localização de instalações. Os resultados encontrados indicaram que o método proposto poderia auxiliar as autoridades competentes na definição de localização para novas escolas ou na realocação de matrículas, de forma a melhor atender à comunidade, e com a redução de custos de deslocamentos.

Ramos (2000) desenvolveu um modelo de localização industrial que permite definir as áreas com maior potencial para a localização de novas indústrias ou para a re-localização de outras já existentes. Este modelo foi baseado em análise multicritério como ferramenta para avaliação das alternativas, ao qual foi integrado o ponto de vista dos empresários industriais e os critérios de ordenamento do território, visando traduzir espacialmente o desenvolvimento articulado das políticas econômicas, social, cultural e ecológica. Foi integrado ao modelo de localização, além da componente espacial, também uma análise de risco na avaliação multicritério. Utilizou-se um Sistema de Informações Geográficas, por possuir, segundo o autor, potentes ferramentas de análise e processamento espacial. O modelo foi aplicado à localização de áreas industriais no município de Valença, noroeste de Portugal, a fim de investigar os critérios de decisão envolvidos na localização de novas indústrias por parte dos empresários dessa região. Concluiu-se que há um substancial afastamento entre as áreas industrias existentes ocupadas e as alternativas dos cenários de avaliação, indicando perda de competitividade no que tange o critério localização industrial.

Lima e Rangel (2002) em seu trabalho propuseram uma integração entre um *software* SIG e algoritmos de otimização, baseados em programação inteira, para a resolução do problema de localização de facilidades, gerando a ferramenta ORMaps, classificado como um Sistema de Apoio à Decisão. A ferramenta ORMaps é desenvolvida a partir da integração entre um SIG, responsável pela coleta e análise dos dados do problema, e algoritmos de otimização, responsáveis pela resolução do modelo matemático, estruturado conforme o modelo das p-medianas. Dentre as várias metodologias aplicáveis para a resolução do problema das p-medianas, os autores adotaram uma metodologia híbrida para a busca da solução ótima do problema, implementando-se dois algoritmos: um deles heurístico, visando a obtenção de uma solução inicial, que é então utilizada como limite superior durante o processo de busca direta em árvore, realizado no segundo algoritmo, exato, baseado na técnica de *branch-and-bound*. Segundo os autores, a principal vantagem desta integração consistiu em possibilitar o uso intuitivo da ferramenta, sem haver a necessidade de qualquer conhecimento prévio de programação inteira por parte dos usuários. Para esta integração, como nem todas as funcionalidades do SIG são necessárias, optou-se pela utilização de

bibliotecas de classes permitindo a inclusão apenas das funcionalidades necessárias, e tornando o ORMaps uma ferramenta independente de qualquer pacote SIG comercial. Chegou-se à conclusão de que o casamento entre algoritmos de otimização e Sistemas de Informação Geográfica é tão benéfico quanto é necessário na confecção de Sistemas de Apoio à Decisão relativa aos problemas de localização de facilidades, conferindo à ferramenta robustez e simplicidade, qualidade e quantidade de informações. O ORMaps foi classificado como um SAD gráfico, intuitivo e capaz de fornecer soluções robustas, ocultando do usuário final a resolução do modelo matemático envolvido.

Lima (2003), propôs um estudo de localização e transporte que permite otimizar a distribuição espacial dos serviços de educação e saúde, conduzido na cidade de São Carlos, buscando minimizar os custos de deslocamento dos usuários. Este trabalho enquadra-se essencialmente na tipologia dos problemas de localização de equipamentos pontuais, tendo como característica específica a preocupação com os critérios de acessibilidade e cobertura da população (demanda) aos equipamentos urbanos de educação e saúde (oferta). Com a utilização de um SIG-T, tornou-se possível realizar análises e pesquisas apoiadas na distribuição espacial das informações. Para alimentar o *software*, foi necessário transformar as referências espaciais alfanuméricas dos sistemas de informações em posições geográficas corretas, representáveis graficamente. Como conseqüência, o endereço urbano se transformou na forma de referência espacial mais importante para efetivar a ligação dos sistemas de informação tradicionais com o SIG. Os resultados demonstraram que quando se deseja otimizar o sistema de transporte, inicialmente deve-se proceder à redistribuição dos pontos de demanda aos pontos de oferta, para então pensar em localizar novas instalações.

Outro exemplo de SIG-T aplicado à logística urbana é citado por Naruo (2003). O autor propõe o uso de um Sistema de Informações Geográficas como ferramenta de apoio à decisão durante a localização de aterros sanitários para disposição final de resíduos sólidos, além de um estudo de roteirização e programação da frota de veículos. O estudo é aplicado a uma área de proteção ambiental da São Paulo, composta por vários municípios, sendo proposto um consórcio intermunicipal para captação de recursos financeiros. A rotina logística de localização do SIG-T definiu, para cada situação, onde estariam localizados os aterros e quais clientes seriam atendidos por cada um deles, ao menor custo logístico, representado pela menor distância total entre os aterros e seus respectivos clientes. Com relação à roteirização, a heurística da rotina demonstrou ser flexível para realizar análises complexas, embora necessitasse de alguns ajustes. O autor concluiu que um aspecto importante da ferramenta SIG

é a capacidade de oferecer a visualização espacial gráfica das soluções obtidas, ampliando o entendimento de especialistas e usuários para as instâncias analisadas.

Hoffmann e Gómez (2003) procuraram definir o posicionamento de um dado número de antenas para projetos de comunicação utilizando sistemas de rádio. Baseado na localização dos pontos receptores potenciais, o usuário deve tomar decisões a respeito do tipo de antena a ser utilizado, sua quantidade e a melhor posição viável das torres, de modo a garantir um bom funcionamento do sistema e a legibilidade do sinal. O objetivo desse trabalho consistiu em utilizar um protótipo de um SIG para auxiliar no posicionamento de torres de radiotransmissão. O problema foi modelado como um problema de localização com máxima cobertura, onde dado um número fixo de antenas, o objetivo é maximizar o número de clientes receptores. Neste trabalho, foram consideradas como técnicas de solução um algoritmo baseado na heurística de localização-alocação e na metaheurística Busca Tabu. Os autores constataram que ambos algoritmos chegaram a resultados com melhorias significativas se comparadas à solução inicial e que, em todos experimentos, o algoritmo de Busca Tabu obteve os melhores tempos de processamento e resultados médios superiores aos do algoritmo de localização-alocação. Os resultados mostraram que a arquitetura do Sistema de Informação Geográfica, utilizada para o desenvolvimento do protótipo, suportou a interpretação e manipulação de dados georreferenciados, viabilizando a análise do modelo de propagação de antenas. O SIG também facilitou a análise topológica entre as antenas transmissoras e os pontos receptores, flexibilizando o processo de geração de vizinhanças para os algoritmos de otimização de posicionamento das antenas.

Morgado *et al.* (2005) fizeram um estudo de localização de terminais rodoviários regionais coletivos de carga em áreas metropolitanas, incorporando os conceitos locacionais de acessibilidade, custos, segurança, confiabilidade e impactos, levando em consideração o julgamento de valor dos tomadores de decisão no processo de escolha. O objetivo do modelo locacional foi o de facilitar a movimentação de mercadorias, a geração e atração de carga, a concorrência e os custos de instalação e manutenção. Os autores utilizam um *software* SIG em conjunto com a teoria dos grafos para estabelecer padrões de acessibilidade, seguido pela utilização da técnica Método de Análise Hierárquica, para a seleção da área mais indicada e, posteriormente, utilizam novamente o *software* SIG para análise de resultados e conclusões.

Com base na literatura recente, pode-se destacar a importância de estudos de localização de instalações em interface com os Sistemas de Informações Geográficas. Um exemplo pode ser visto em Arakaki e Lorena (2006), que desenvolveram uma nova heurística de

localização-alocação, aplicada aos algoritmos de problema de localização de máxima cobertura e problema das p-medianas capacitado, que constitui também o cerne da presente pesquisa, a fim de minimizar o custo de transporte ao se localizar as facilidades e, porventura, integrá-la ao SIG. Esta heurística foi validada a partir de uma bateria de problemas testes, cujas melhores soluções eram conhecidas a partir de resultados de outros trabalhos. Os autores concluíram que a heurística apresenta-se como um método promissor, pela sua relativa simplicidade de implementação, enorme rapidez e eficiência comprovadas e, portanto indicada para ser integrada ao SIG.

Camargo e Cunha (2006) fizeram um estudo de *clusterização* e localização com restrição de capacidade, e comparou os resultados gerados pelo Sistema de Informações Geográficas com as soluções da heurística desenvolvida pelos autores, em planilha eletrônica do Excel, estruturada em linguagem *Visual Basic*. Embora o SIG não possua um algoritmo para resolução do problema de *clusterização* capacitado (CCP – *Capacitated Clustering Problem*), o *software* possui os algoritmos de *clusterização* ("*Clustering*") e de localização de facilidades ("*Location Facility*"), o que viabiliza a comparação entre as heurísticas. O trabalho apresentou resultados computacionais que evidenciaram a qualidade das soluções obtidas pela heurística implementada em Excel, em termos de custo total, se comparada às soluções geradas pelo SIG. Com relação ao tempo de processamento, a heurística desenvolvida também se mostrou compatível com os tempos do SIG. Os autores concluíram que o desenvolvimento de heurísticas é uma alternativa para resolver problemas de clusterização e localização sem o uso de pacotes sofisticados, e muitas vezes pouco acessível em termos monetários.

Carrara *et al.* (2006) realizaram um estudo de localização de terminais logísticos urbanos com o uso da ferramenta SIG, aplicado a pontos comerciais na cidade de Uberlândia, Minas Gerais, com foco na minimização do custo médio de serviço de transporte. O objetivo foi apresentar uma alternativa operacional para redução da problemática da movimentação de veículos de carga urbana. Segundo os autores, a simples regulamentação de horários para as operações de carga/descarga se apresentam como boas alternativas de curto prazo, e como alternativas de longo prazo tem-se a definição do tamanho de veículos de carga, locais de parada e horários mais favoráveis às manobras de estacionamento e de conversões nas principais interseções. Os autores comprovam que o SIG pode ser útil na tomada de decisão para o problema de localização e transporte urbano.

Os conceitos e aplicações de Sistemas de Informações Geográficas apresentados neste capítulo, complementando e integrando os conceitos descritos no capítulo anterior sobre localização de instalações, visam proporcionar o embasamento teórico para o estudo de localização-alocação de instalações proposto neste trabalho. Sendo assim, nos próximos passos desta pesquisa segue-se a descrição de como o problema de localização-alocação de instalações será tratado na abordagem em que se faz uso do SIG, demonstrando as relações entre suas principais rotinas durante o tratamento do problema e, posteriormente, descreve-se a maneira como o modelo de localização-alocação foi formulado segundo a abordagem PLIM, apresentando os parâmetros e variáveis que descrevem a função objetivo e restrições do modelo.

4 Localização-Alocação de Instalações no SIG TransCAD

Após a apresentação da fundamentação teórica envolvendo os conceitos de localização de instalações e Sistemas de Informações Geográficas, o presente capítulo é dedicado à apresentação das características técnicas e operacionais do SIG TransCAD, que será aplicado ao problema de localização-alocação de instalações. Aborda-se o modelo SIG e suas três rotinas integradas à resolução do problema: Criação de Matriz de Custos, Localização de Facilidades e Problema do Transporte.

Os Problemas de Localização, por envolverem um grande número de variáveis e grandes volumes de dados, tornam-se uma abordagem complexa. Os SIG permitem analisar e comparar um alto número de alternativas e escolher a que se adapta melhor à estratégia organizacional. Sendo assim, problemas de localização podem e devem ser tratados com o uso destas ferramentas computacionais, que possuem características de armazenar, manipular e gerenciar grandes volumes de dados geográficos, executando operações sobre os mesmos e gerando informações que permitem a correta tomada de decisões espaciais.

Dentro deste contexto e da logística, a ferramenta SIG tem diversas aplicações em problemas de localização, seja de fábricas, centros de distribuição, pontos comerciais ou planejamento público. Além de fazer análises e gerar mapas temáticos utilizando mapas digitalizados, que contêm a representação de malhas viárias, permitem ao usuário visualizar espacialmente os resultados gerados. Uma grande vantagem da ferramenta computacional é a facilidade de representação visual, que permite ampliar o entendimento de especialistas e usuários do sistema.

O SIG utilizado como ferramenta de apoio aos estudos de localização-alocação de instalações na presente pesquisa foi o *software* TransCAD[®], versão 4.5. Esta opção se deve ao fato de que este *software*, além de funcionar como um banco de dados, capaz de suportar um grande número de informações, também possui rotinas especialmente criadas para o planejamento em transportes, cujo uso depende do objetivo que se queira atingir.

Caliper (1996) define o TransCAD como um Sistema de Informação Geográfica projetado especificamente para o planejamento, gerenciamento, operação e análise das características dos sistemas de transportes, enquadrando-o assim como um SIG-T. O *software*

possui vários módulos para a manipulação de dados com relação à entrada, armazenagem, análise e apresentação final. Suas aplicações podem abordar estudos de magnitude internacional, nacional, regional e local, podendo ser projetado para analisar e capturar dados, por exemplo, de redes de transporte, fluxo de cargas, rotas, programação de veículos ou demanda de passageiros. Possui potencialidades para analisar vários tipos de redes: de transporte público, rodovias, ferrovias, metrovias, aerovias, submarinas ou multi-modais.

Segundo Rose (2001), o sucesso de um projeto depende do uso de ferramentas adequadas para o seu desenvolvimento, sendo necessário o conhecimento das características, funções e desempenho da ferramenta escolhida. A autora avalia as características operacionais básicas, rotinas avançadas de SIG e rotinas específicas de transportes para três *softwares* SIG-T, dentre eles o TransCAD, avaliando comparativamente estes *softwares* com relação ao desempenho e funções disponíveis para o planejamento em transportes. Dentre as características operacionais básicas, os *softwares* foram avaliados quanto à modelagem dos dados, quanto à linguagem de consulta, quanto à geração de saídas gráficas e relatórios, importação e exportação de arquivos, quanto à entrada e à edição de dados. Dentre suas rotinas avançadas, foi classificado em termos de manipulação de dados.

Analisando algumas das características operacionais básicas apresentadas, com relação à modelagem de dados, pode-se dizer que o TransCAD aceita dados descritos em termos de feições com atributos, suporta complexas modelagens de feições, permite codificação de redes, suporta interface com banco de dados relacionais, permite estruturação topológica dos dados, distingue a representação gráfica da geométrica, suporta séries temporais de dados, além de permitir o acesso aos dados através de linguagem de alto nível, estrutura de menus e ícones e linguagem de consulta estruturada SQL (*Structured Query Language*), que habilita a interação com o banco de dados.

Quanto à entrada de dados, o TransCAD permite a associação de camadas de pontos, linhas e áreas, suporta o usuário na criação da topologia e nos processos de atribuição de códigos, fechamento de polígonos e reconhecimento de proximidade, e suporta a transferência entre bases de dados. Quanto à edição de dados, o *software* identifica quaisquer camadas a partir de códigos ou coordenadas, permite a manipulação de camadas, permite a definição de limites de tolerância, a inserção automática de indicação de escala, de indicativo da direção Norte, além de permitir a geração de mapas temáticos.

Em suas rotinas avançadas, relacionadas à manipulação de dados, o TransCAD permite a extração de dados por código, atributo ou critério não combinados, a realização de

operações geométricas, como o cálculo de distâncias, perímetros ou áreas, suporta um banco de fórmulas para filtragem dos dados e geração de novas colunas, geração de áreas de abrangência (buffers), criação e manipulação de redes, realização de agrupamentos, particionamentos e localização de facilidades, obtenção de caminhos mínimos baseados em custos de deslocamentos, realização de sobreposição (overlay), geração de áreas de busca, geração de modelo digital de terreno, geração de curvas de nível, extração de informações estatísticas, geração de gráficos de representação de dados, e realização de procura e identificação de endereços.

Rose (2001) concluiu em seu trabalho que o *software* TransCAD atende plenamente às condições necessárias para atuar como um SIG-T, uma vez que disponibiliza comandos de geração e manipulação de redes, matrizes, banco de dados e visualização de resultados em mapas temáticos. Para fins de simplificação de redação, embora o TransCAD seja um SIG-T, ao longo desta pesquisa o mesmo será referenciado apenas como SIG, ficando claro que é um sistema que possui aplicações em planejamento de transportes.

Como o trabalho envolve a localização e alocação de instalações, escolheu-se o módulo do *software* TransCAD que trata de logística. Dentre as possíveis alternativas apresentadas no módulo, existem três rotinas que se enquadram na abordagem adotada para o tratamento do problema: Criação da Matriz de Custos, Localização de Facilidades e Problema do Transporte. Para que se tivesse um melhor resultado na aplicação do método de localização e alocação de instalações, fez-se a junção destas rotinas, aplicando-se os resultados de uma para alimentar outra, sendo executadas em seqüência, obtendo-se, assim, um resultado mais próximo ao desejado.

A principal idéia presente nesta pesquisa, ao se utilizar o SIG para a resolução do problema de localização-alocação de instalações, é avaliar a qualidade da combinação das rotinas Localização de Facilidades e Problema do Transporte, de tal forma que a saída da primeira seja a entrada da segunda. A Figura 4.1 ilustra esta seqüência de rotinas utilizada para resolução do problema de localização-alocação, segundo o modelo SIG.

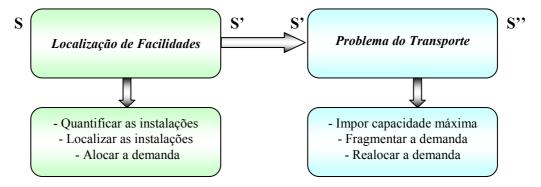


Figura 4.1 – Problema de localização-alocação no modelo SIG

A rotina Localização de Facilidades inclui a abertura de novas unidades ou fechamento das já existentes, buscando definir o número de instalações em operação, suas respectivas localizações, e a melhor alocação possível entre uma série de clientes às instalações, visando minimizar os custos de deslocamentos. Sendo assim, são geradas duas saídas primárias: a localização das novas instalações abertas (ou fechadas, se for o caso) e a respectiva alocação entre os clientes, de maneira que um centro de oferta possa atender vários centros de demandas, porém um centro de demanda será abastecido por um único centro de oferta, sem levar em consideração um limite máximo de capacidade das instalações. Como esta não é uma prática comum no mercado atual, onde um cliente pode ter sua demanda atendida por mais de um fornecedor, a rotina Problema do Transporte, deve ser executada na seqüência.

Por não estabelecer um limite superior de capacidade, a rotina Localização de Facilidades aloca o fluxo total de cada cliente a uma determinada facilidade, não sendo capaz de fragmentar as demandas dos clientes, ou seja, faz com que cada cliente seja atendido por uma única facilidade. A rotina baseia-se na suposição de que se determinada solução gera o menor custo para se transportar uma unidade de produto, será também a melhor solução para os demais itens, sem se preocupar com um limite de capacidade máxima de operação da facilidade. Sendo assim, para que o problema de localização-alocação tenha um limite máximo de capacidade como restrição, faz-se necessário executar a rotina Problema do Transporte, a qual aumentará o nível de adequação do problema à realidade empresarial, permitindo que um cliente seja atendido por mais de uma facilidade.

A saída da rotina Localização de Facilidades se torna a entrada da rotina Problema do Transporte, sendo uma executada na seqüência do outra. A rotina Problema do Transporte, apesar de incluir as capacidades das instalações, não considera, entretanto, a abertura ou fechamento de novas unidades. A saída desta rotina é uma matriz de fluxos, em que as linhas

representam os centros de oferta ativos e as colunas indicam o conjunto de clientes. Esta matriz indica a quantidade de demanda de cada cliente alocada a cada facilidade, de maneira a resultar em um menor custo para o sistema, respeitando-se as capacidades máximas das facilidades. Tem-se a ressalva de que, quando a capacidade de uma das facilidades é atingida, a rotina aloca a porção restante da demanda do atual cliente para a facilidade mais próxima.

Esta seqüência de otimização possui grande desvantagem na procura da solução que venha a representar o ótimo global, pois as decisões de número e localização de instalações devem ser tomadas de forma conjunta com as decisões de distribuição de demanda à oferta e os limites de capacidade das instalações, uma vez que uma decisão interfere de forma simultânea na outra. Ao tomar uma decisão de forma indireta, uma após a outra, como é feita no SIG utilizado, a realocação das demandas conforme o limite máximo de capacidade de oferta fica condicionada a uma configuração inicial de número e localização de instalações, que podem não representar a solução de menor custo na rede logística, para aquela determinada situação. Esta é a hipótese que se deseja investigar ao aplicar esta abordagem ao problema de localização-alocação de instalações.

As rotinas escolhidas do SIG possuem classes particulares de algoritmos, que serão apresentadas nas seções 4.1 para a Criação da Matriz de Distâncias, seção 4.2 para a rotina Localização de Facilidades e seção 4.3 para a rotina Problema do Transporte.

4.1 Criação da Matriz de Distâncias

Esta é a matriz que contêm as distâncias, entre cada par cliente/candidato à localização de instalações. É a entrada primária para se resolver qualquer problema de localização que tem como objetivo a minimização de custos de transportes, quando relacionado às distâncias percorridas entre pontos de oferta e demanda. Uma vez criada esta matriz, ela servirá de base para a resolução do problema de localização para diferentes cenários, devendo ser recalculada apenas se novos nós forem adicionados à rede, ou se aparecerem novas vias. Um exemplo que exige a criação de uma nova matriz de distâncias é quando se desejar adicionar novos pontos clientes ou novos locais candidatos à abertura de instalações, na inclusão de uma facilidade ainda não considerada, ou quando surgirem novas rodovias com a expansão das cidades.

A matriz de distâncias pode ser calculada a partir de dois métodos distintos dentro do software SIG: pela rede viária ou baseada nas distâncias euclidianas entre os pontos. O método que faz uso da rede viária, representado por camada específica de linhas, é mais preciso e realista que o segundo método, baseado em distâncias euclidianas. O método utilizado nesta pesquisa baseou-se no cálculo pela malha viária, uma vez que se encontra disponível para o estudo a camada de linhas contendo as principais rodovias que conectam os centros de demandas aos possíveis centros de oferta, advindos do trabalho realizado por Lima (2003).

Para se utilizar este método, é necessário que se tenha, inicialmente, criado uma rede. A criação desta rede se faz a partir da camada que contem as rodovias, a qual armazena as distâncias de cada segmento (ou *link*) da malha viária, composta por arcos e nós, estando cada segmento relacionado a um identificador único, presente na base de dados relacionada. Com a criação da rede, o *software* SIG está apto a determinar a matriz de distâncias através de uma rotina de caminhos ou tempos mínimos, opção esta feita pelo usuário em opções do *software*. Nem sempre o menor caminho, em termo de distâncias, é aquele que permite o menor tempo de deslocamento ou o menor custo percebido. No caso deste trabalho, a escolha foi a de encontrar o menor caminho, constituído pelo conjunto de *links* que conectam dois pontos, e que minimizam as distâncias percorridas. Em outras palavras, o caminho com o menor valor de distância entre dois pontos quaisquer, A e B, é aquele onde o somatório dos vários segmentos (*links*) entre estes pontos conduzam a um menor valor numérico.

A determinação do menor caminho é um problema que aparece com certa frequência, de maneira direta ou indireta, em processos de otimização em redes de transportes. O SIG utilizado possui a capacidade de encontrar o melhor caminho entre dois ou mais pontos quaisquer de uma rede, ou seja, aquele que minimiza o valor total de um atributo particular da rede, tal como: distância, tempo ou custo monetário. Pode também encontrar rotas que minimizam uma combinação de atributos, através de uma fórmula, como um atributo na rede.

4.2 Localização de Facilidades

O modelo de localização do SIG é utilizado para identificar boas localizações de uma ou mais facilidades, como depósitos, hospitais, escolas, fábricas ou qualquer outro tipo de

instalação, nos setores público ou privado, a partir de um conjunto de locais possíveis, denominados locais candidatos. Cada facilidade tem por objetivo atender as demandas dos clientes. Para cada combinação de cliente e facilidade deve estar associado um custo de serviço, aqui expresso em termos de custos de transportes, armazenado na matriz de distâncias, previamente calculada.

Em geral, o objetivo da localização é determinar o mínimo número possível de instalações que garantam um certo nível de serviço, minimize custos de operações ou maximize lucros. As ferramentas disponibilizadas no *software* SIG utilizado são (CALIPER, 1996):

- Minimização do custo médio de serviço oferecido aos clientes: não leva em consideração se o serviço prestado a um cliente em particular é muito pior que a média. Nesta opção, pode-se desejar localizar um número n de facilidades, ou deixar que o software decida a quantidade necessária de instalações para que se garanta certo nível de serviço, caracterizando um problema de cobertura. Pode-se desejar, por exemplo, que a distância máxima entre um centro de oferta e um cliente qualquer seja inferior a determinado valor;
- Minimização do custo mais elevado de serviço: o objetivo é prover o melhor serviço
 possível para os clientes mais distantes do conjunto de facilidades, muito utilizado,
 por exemplo, para minimizar a maior distância entre clientes e serviços
 emergenciais. Também possui a opção de se localizar um número fixo de instalações
 ou a quantidade necessária para se obter o custo mais alto de serviço abaixo de um
 valor desejado;
- Maximização do custo mais baixo de serviço: utilizado para se localizar um número fixo de facilidades o mais distante possível de qualquer cliente. Freqüentemente utilizado para efetuar a localização de facilidades indesejadas, como incineradores e aterros sanitários;
- Maximização do lucro da empresa: através da localização de certo número de facilidades requeridas, podendo ou não haver um limite máximo de número de facilidades ou restrições orçamentárias, limitado a um custo fixo total associado à localização das novas facilidades.

É comum estar associado a problemas de localização de instalações algumas restrições, tais como restrições operacionais ou financeiras, impondo limites a recursos humanos, orçamentários ou de materiais. Outra implicação em problemas de localização é dada quando se têm instalações já em operação, que acabam por influenciar na localização das novas instalações. Uma situação comum envolve tanto a abertura quanto o fechamento de uma ou mais facilidades.

Os dados de entrada utilizados para a resolução do problema de localização de instalações no SIG se resumem em dois tipos: dados geográficos e dados de demandas. Os dados devem estar associados a uma camada de pontos (ou de áreas), a qual armazena informações referentes aos clientes e suas respectivas demandas, as instalações existentes e locais candidatos à abertura de novas instalações, com suas respectivas coordenadas geográficas, cada um destes conjuntos ocupando um conjunto de seleção distinto no banco de dados relacionado. Outro dado de entrada primordial em estudos de localização está contido na matriz de custos, no caso deste trabalho, representada pela matriz de distâncias, previamente analisada.

No SIG utilizado, pode-se desejar ter os conjuntos de informações separados em camadas distintas, ou armazenadas em uma única camada, que reúna todas as informações relativas aos clientes, instalações existentes e candidatos à abertura de novas instalações. Optou-se, neste trabalho, pela utilização de uma camada única, agrupando todas as informações relativas ao problema abordado, sendo criado um conjunto de seleção distinto no banco de dados para armazenar informações relativas ao conjunto de clientes, ao conjunto de instalações existentes e aos locais candidatos à localização de novas facilidades.

Existem dois conjuntos de saídas primárias para a rotina de Localização de Facilidades do SIG: a localização das novas facilidades e a alocação de fluxos entre as facilidades existentes e novas instalações a seus respectivos clientes. Esta rotina cria um novo conjunto de seleção em seu banco de dados, subconjunto dos elementos que constituem os candidatos à localização, associado à camada que contém as informações sobre as facilidades, que é automaticamente mostrado no mapa. Além disto, o SIG gera uma tabela que associa cada cliente a uma nova facilidade, ou a uma facilidade já existente, e também mostra o custo do serviço associado àquela alocação, no caso, as distâncias. Esta tabela pode ser usada para criar mapas temáticos, ilustrando a alocação entre clientes e facilidades.

Segundo Caliper (1996), os algoritmos utilizados pelo SIG em sua rotina de Localização de Facilidades, quando se deseja localizar um número fixo de facilidades, são:

- Na fase de construção de uma solução inicial, identifica-se um conjunto de localizações iniciais, utilizando-se para isto de uma heurística GRASP, que escolhe a melhor localização, relacionada ao objetivo desejado, através da avaliação de todos os candidatos;
- Na fase de procura da melhor solução, visando atender a determinado objetivo, a
 heurística embutida no software visa melhorar a solução inicial, previamente gerada,
 através de movimentos de troca entre pares de candidatos, até que soluções melhores
 não sejam mais encontradas.

Quando se utiliza a rotina de Localização de Facilidades para o problema de cobertura, que determina o número de localizações a serem abertas a fim de se alcançar determinado parâmetro, o algoritmo também trabalha em dois estágios (CALIPER, 1996):

- Determina-se onde localizar uma nova facilidade usando-se uma heurística GRASP. Se nenhuma facilidade for adicionada, o algoritmo pára.
- Tenta-se melhorar o conjunto corrente de localizações, realizando-se movimentos de troca entre pares de candidatos, até que soluções melhores não sejam mais encontradas. Em seguida, retorna para o passo inicial e tenta adicionar uma nova facilidade.

Para se estabelecer um critério que atenda aos objetivos do problema de localizaçãoalocação em questão, a função objetivo a ser modelada deve levar em consideração os custos
de transporte, relacionados às distâncias entre os nós. Por outro lado, a distância não é o único
fator de custo, já que cada nó tem uma demanda associada, que também interfere diretamente
nos custos. Ao se desconsiderar este fator, estará se desconsiderando os valores das demandas
atendidas, procedendo-se à rotina de localização de facilidades sem nenhum vínculo com a
variável de demanda, levando-se em consideração apenas variáveis geográficas. Sendo assim,
a cada par de pontos oferta/demanda será feita uma ponderação pelos valores de demanda,
que será multiplicado ao valor da distância percorrida entre estes pontos, sendo esta uma
opção presente em rotina própria do SIG. Os valores de demanda funcionarão na função
objetivo como um peso, ou fator de atração. A justificativa para se empregar este peso é o fato
de se estar trabalhando com dados agregados, cuja representação é dada em termos de uma
variável escolhida como parâmetro, no caso, as demandas de cada cliente.

4.3 Problema do Transporte

O software SIG inclui procedimentos para resolução de problemas de fluxo em rede, como o procedimento de Problema do Transporte. No caso desta pesquisa, o Problema do Transporte envolve a distribuição eficiente de produtos a partir de centros de oferta, cada qual com sua capacidade máxima de operação definida, com destino ao conjunto de clientes, cada qual com seus respectivos valores de demanda, de forma a minimizar os custos de transporte, em função das distâncias entre os pontos de oferta/demanda, e respeitando o limite máximo de capacidade das instalações.

Segundo Caliper (1996), a rotina Problema do Transporte presente no SIG usa de uma adaptação do método *simplex* da programação linear, sendo também referenciado como "*Hitchcock Transportation Problem*". Neste algoritmo, quando a solução ótima é encontrada, o número de segmentos (*links*) que transportam fluxos de produtos deve ser igual ao número mínimo de segmentos utilizados para conectar os nós de oferta aos de demanda, ou seja, igual ao número total de nós de oferta e demanda menos uma unidade, sendo que todos os outros *links* permanecerão vazios. A busca pela melhor solução é feita através de trocas sistemáticas entre segmentos até que melhorias não possam mais ser realizadas.

Com a aplicação deste procedimento, torna-se possível a distribuição segmentada de demandas, ou seja, possibilita que qualquer número de clientes possa ser servido por uma única facilidade, e que múltiplas facilidades possam servir um único cliente, característica esta não abordada na rotina de Localização de Facilidades. O procedimento resolve o Problema do Transporte buscando a solução de menor custo para transportar determinado produto, a partir de múltiplas fontes de oferta, com destino a múltiplas fontes de demanda. No caso, a solução de menor custo é representada por aquela em que há as menores distâncias percorridas entre os elos envolvidos.

Para esse procedimento, inicialmente, o *software* SIG assume que o sistema esteja "balanceado". Admitir um sistema balanceado significa dizer que o somatório das ofertas deve ser igual ao somatório das demanda por aquele produto ou serviço. Se o sistema em questão não estiver balanceado, existem rotinas a serem seguidas para torná-lo um sistema balanceado, como a inclusão de um nó fictício que represente a oferta ou demanda excedente, localizado em um ponto estratégico. Desta forma, assume-se o sistema como balanceado, procedendo-se às respectivas medidas de ajuste para que a rotina possa ser aplicada, ou seja,

redistribuindo-se de modo proporcional as capacidades máximas de oferta das instalações à demanda total dos clientes.

Analisando a rotina Problema do Transporte de forma desagregada da rotina Localização de Facilidades, os dados de entrada para a rotina Problema do Transporte são:

- Uma única camada, de pontos ou de áreas, contendo os centros de oferta e demanda, ou mesmo duas camadas, cada qual contendo ou os centros de demanda ou os centros de oferta. Neste trabalho, optou-se pela utilização de uma camada única para representar as entidades;
- Uma seleção indicando os pontos de oferta, e outra indicando os pontos de demanda, associadas a um banco de dados contendo um campo incluindo os respectivos valores de demanda e oferta, quando for o caso. Estes conjuntos devem ser, necessariamente, exclusivos, ou seja, um ponto de oferta não pode, ao mesmo tempo, ser um ponto de demanda;
- Uma matriz de distâncias, indicando o custo de se transportar uma unidade de produto entre cada par de pontos de oferta e demanda.

Apresentadas as características e particularidades do modelo SIG para a resolução do problema de localização-alocação de instalações, o próximo passo do trabalho será a definição da metodologia de pesquisa adotada, que será apresentada no capítulo seguinte.

5 Metodologia de Pesquisa

A partir da fundamentação teórica sobre localização de instalações e Sistemas de Informações Geográficas e a apresentação das características do modelo SIG, a ser aplicado ao problema de localização-alocação de instalações, este capítulo visa apresentar a metodologia de pesquisa a ser utilizada no trabalho, destacando a formulação matemática do modelo PLIM, baseado em Programação Linear Inteira Mista. Descrevem-se as etapas do método de pesquisa a ser utilizado, bem como a classificação da metodologia da pesquisa.

Como visto na revisão bibliográfica, este trabalho insere-se essencialmente na tipologia dos problemas de localização, tendo como força direcionadora especial atenção aos fatores econômicos, aqui representados pelos custos de transporte, calculado como a soma das distâncias percorridas entre pontos de oferta e de demanda. Além disto, o problema abordado enquadra-se na localização múltipla de instalações, onde a escolha de candidatos se dará em um espaço discreto da rede.

O problema de localização-alocação abordado nesta pesquisa abrange os níveis de planejamento estratégico, a partir do momento em que envolve decisões sobre o número de instalações, suas localizações e capacidades, e enquadra-se também no nível de planejamento gerencial, quando se definem os fluxos de transporte entre os centros de oferta e respectivos centros de demanda, determinando as alocações entre os elos.

Segundo o escopo da pesquisa, o principal objetivo é avaliar a qualidade da solução do problema de localização-alocação de instalações gerada pelo *software* SIG, em suas rotinas combinadas: Localização de Facilidades e Problema do Transporte. Para efetuar esta avaliação, será proposto um modelo matemático exato, formulado segundo a técnica de Programação Linear Inteira Mista, então denominado modelo PLIM, externo ao SIG, interagindo com o mesmo.

5.1 Problema de localização-alocação de instalações no modelo PLIM

O modelo PLIM será formulado segundo uma variação do modelo das p-medianas. A Programação Linear Inteira Mista é o método mais empregado para resolução de problemas de localização formulados segundo o modelo das medianas, conduzindo para a solução matemática ótima do problema, conforme abordado na revisão bibliográfica (CHURCH & SORENSEN, 1996; LACERDA, 1999; VALLIM FILHO, 2004).

O modelo PLIM foi implementado usando-se o *software* de otimização LINGO[®], versão 7.0, um programa computacional modelador e otimizador utilizado para resolução de problemas de programação linear e não-linear, o qual fará ainda interface com uma planilha eletrônica do *software* Excel[®], versão 10, permitindo uma maior facilidade na organização dos dados e visualização numérica dos resultados.

A escolha pelo *software* LINGO baseou-se na relativa facilidade de compreensão da linguagem de modelagem utilizada pela ferramenta e na possibilidade de integração com planilhas eletrônicas, geralmente adotadas em processos de decisão nos quais envolvem grandes quantidades de dados. Além destas vantagens, foi utilizado o *software* LINGO em detrimento ao próprio recurso otimizador "Solver" do Excel devido às restrições com relação à complexidade do problema abordado e à capacidade de solução do *software*, conforme ilustra o Quadro 5.1.

Capacidade	Standard Excel Solver	Premium Solver	Premium Solver Platform	LINGO 7.0
Total de Variáveis Lineares	200	2.000	8.000	Ilimitado
Total de Restrições Lineares	200	1.000	8.000	Ilimitado

Fonte: http://www.solver.com/xlscompare.htm

Quadro 5.1 – Limite máximo de variáveis e restrições suportado por cada software

O recurso "Standard Excel Solver", oferecida pela própria Microsoft Corporation como ferramenta otimizante do Excel, mesmo em suas versões mais avançadas, como a "Premium Solver" e a "Premium Solver Platform", oferecidas pela Frontline Systems, não foram utilizadas para resolver o problema de localização-alocação proposto nesta pesquisa, por

possuir capacidade inferior ao número de variáveis existentes em algumas aplicações propostas para simulação. Já o *software* LINGO não impõe limites para variáveis e restrições, lineares, não-lineares ou inteiras, no tratamento de problemas. O principal fator limitante do *software* é a quantidade de memória disponível no computador e a velocidade do processador, responsáveis pelo tempo de busca da melhor solução do problema.

5.1.1 Descrição do modelo PLIM

Antes de apresentar a formulação matemática do modelo PLIM, a ser aplicado ao problema de localização-alocação de instalações, serão apresentadas suas etapas de definição, modelagem e solução. Na fase da definição do problema, o principal objetivo do modelo matemático a ser desenvolvido é com relação à redução de custos logísticos de transporte, relacionados à distância total percorrida entre centros de oferta (ou de distribuição) e centros de demanda. Nesta fase, é necessário que o problema seja definido nos mesmos moldes em que foi determinado no SIG, para posterior comparação dos resultados gerados.

É importante ressaltar que, como hipótese simplificadora, o único componente de custo envolvido no modelo proposto será o custo de transporte, assim como ocorre no modelo SIG. É sabido que existem diversos outros tipos de custos envolvidos em problemas de localização, tais como custos de abertura ou fechamento de unidades, custos de estoques, de operação, de administração etc. No entanto, como o foco da pesquisa está na qualidade matemática da solução obtida no modelo SIG comparada à solução ótima do problema, e na interação entre o modelo desenvolvido e o SIG, a não consideração dos custos não influenciará nesse aspecto, visto que os mesmos serão desconsiderados em ambos os modelos. Obviamente, numa aplicação prática real em um problema de localização, não se poderiam desprezar esses custos.

A modelagem será estabelecida em função de alguns parâmetros e variáveis, que definirão a função objetivo e restrições do modelo, preservando-se a semelhança com as rotinas do SIG. O modelo PLIM, contrariamente às rotinas de SIG (formuladas com base em heurísticas que, conceitualmente, não garantem a melhor solução), por ser um modelo exato, garante a solução matemática ótima do problema. Sendo assim, ao se comparar a qualidade

das soluções geradas, deve-se levar em conta esta particularidade, além do modelo PLIM ser capaz de, dado o número de instalações e suas respectivas capacidades, gerar as melhores localizações e alocações entre demanda e oferta, de acordo com os limites de capacidade máxima, de forma simultânea.

A Figura 5.1 resume as etapas de definição, modelagem e solução do modelo PLIM.

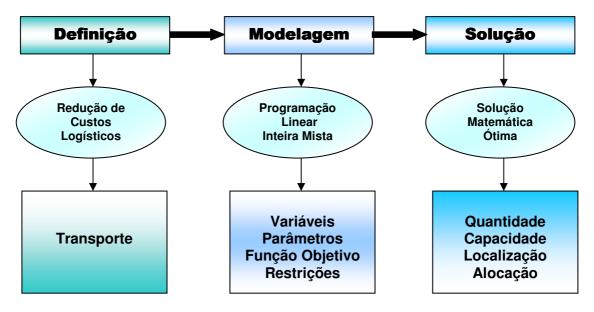


Figura 5.1 – Etapas do modelo PLIM

Para a etapa de modelagem matemática, os índices utilizados na modelo PLIM, ilustrados na Figura 5.2, representam os elos da cadeia logística considerados. O índice *i* denota o conjunto de todos os pontos de oferta ou de distribuição, podendo representar facilidades existentes ou mesmo os pontos candidatos à localização de novas facilidades. O índice *j* determina o conjunto de todos os pontos clientes, que deverão ter suas demandas supridas pelas facilidades localizadas em *i*.



Figura 5.2 – Elos considerados na formulação do modelo PLIM

A formulação matemática baseada em PLIM do problema de localização, proposto como modelo externo ao SIG, é apresentada na seqüência.

Função Objetivo:

$$\min fo = \sum_{i} \sum_{j} C_{i,j} * X_{i,j} * d_{j}$$
 (5.1)

Sujeito às restrições:

$$\sum_{i} z_i = p \tag{5.2}$$

$$X_{i,j} \le z_i \qquad \qquad \forall_{i,j} \tag{5.3}$$

$$\sum_{i} X_{i,j} = 1 \qquad \forall_{j}$$

$$\sum_{i} d_{j} * X_{i,j} \le m_{i} * z_{i} \qquad \forall_{i}$$
 (5.5)

$$z_{i} \in (0,1) \qquad \forall_{i}$$

$$X_{i,j} \in Z^+ \qquad \forall_{i,j} \tag{5.7}$$

Em que:

 $X_{i,j}$: é a matriz solução. Indica a porcentagem da demanda de j atendida por i;

 $C_{i,j}$: matriz de custos, representada pelas distâncias mínimas entre os pontos i e j;

 z_i : é um vetor de binários, que indica quais facilidades estão abertas. Se $z_i = 1$, a facilidade i está aberta. Caso contrário, se $z_i = 0$, então a facilidade i não está em operação;

 d_j : vetor que armazena as demandas dos clientes j;

 m_i : parâmetro de entrada que define a capacidade máxima da facilidade i;

p: parâmetro de entrada que especifica a quantidade de facilidades a serem abertas.

A equação 5.1 representa a função objetivo do modelo, que visa minimizar o custo de transporte, em função das distâncias entre os pontos *i* e *j*, ponderado pela porcentagem da demanda atendida, assim como a função objetivo utilizada no SIG, para posterior comparação

dos resultados gerados entre os dois modelos. Vale ressaltar que, para gerar soluções em que um cliente possa ser abastecido por mais de uma facilidade, tal como ocorre no modelo Problema do Transporte do SIG, a variável de decisão $X_{i,j}$, não negativa, representa uma fração da demanda do cliente j atendida pela facilidade i.

Neste trabalho, é abordado o problema das p-medianas puro, no qual o custo considerado consiste na soma das distâncias de cada vértice de demanda (cliente) à sua mediana (facilidade) mais próxima. Owen e Daskin (1998) e Crainic (1998) fizeram revisões dos principais métodos de otimização utilizados na resolução do problema de localização e concluíram que os modelos matemáticos baseiam-se principalmente em fatores de custos relacionados ao transporte. Sendo assim, o termo $C_{i,j}$ presente na função objetivo do modelo visa representar os custos de transportes, em função das distâncias entre os pontos de oferta e demanda, que será então ponderado pela fração de demanda do cliente suprida pela facilidade.

Com relação às restrições, vale ressaltar que a equação 5.2 é a restrição que indica a quantidade de facilidades a serem abertas, equivalente ao número p; a fórmula 5.3 representa a restrição de abertura de facilidade, ou seja, se a facilidade i não está em operação ($z_i = 0$), a alocação de demanda a esta facilidade deve ser nula; a equação 5.4 representa a restrição de cobertura de demanda, na qual todos clientes deverão ter 100% de suas demandas atendidas; a fórmula 5.5 representa a restrição de limite superior de capacidades das facilidades a serem abertas; a fórmula 5.6 torna o vetor de saída z_i um vetor de binários; e a fórmula 5.7 torna a matriz solução $X_{i,j}$ uma matriz de inteiros.

5.2 Etapas da metodologia de pesquisa

A fim de atingir o objetivo da pesquisa, ou seja, avaliar a qualidade das soluções geradas pelo modelo SIG, em comparação com as soluções ótimas obtidas pelo modelo PLIM, é necessário estabelecer uma metodologia de pesquisa a ser seguida. Esta metodologia está dividida em 5 fases, compostas por um total de 19 etapas, apresentadas na seqüência.

Fase I: Definição dos nós da rede

1. Centros de Oferta: definir as localizações geográficas das instalações existentes, caso existam e pretende-se que sejam consideradas.

- 2. Centros de Demanda: definir as localizações geográficas dos clientes, que deverão ter suas demandas supridas pelas instalações.
- 3. Candidatos à Localização: definir a política para criação dos pontos candidatos à localização de novas facilidades e suas respectivas localizações geográficas.

Fase II: Dados de entrada para os modelos de localização-alocação de instalações

- 4. Matriz de Distâncias: a partir da definição dos nós da rede, integrados a uma base de dados geograficamente referenciada, é possível, por rotina interna do SIG, calcular a matriz de custos, responsável por armazenar as distâncias entre todos os nós da rede. Esta matriz servirá como dado de entrada também para o modelo PLIM, estabelecendo uma interação entre os modelos.
- 5. Dados de Demanda: alimentar os modelos com os valores de demanda dos clientes.
- 6. Dados de Oferta: alimentar os modelos com os valores de oferta para as instalações existentes e candidatas à localização, de forma que o somatório de oferta seja igual ao somatório das demandas, para se ter um problema balanceado, atendendo à particularidade do modelo SIG.
- 7. Limites de Capacidade: criar uma política para estabelecer as capacidades máximas de operação das instalações. Inicialmente, estes dados serão entrada direta apenas para o modelo PLIM.

Fase III: Modelo SIG para localização-alocação de instalações

- 8. Localização de Facilidades: a partir da matriz de distâncias, dados de demanda e oferta, executar a rotina interna Localização de Facilidades do SIG.
- 9. Localiza e aloca demanda/oferta: como solução, a rotina Localização de Facilidades irá localizar e alocar a demanda à oferta, porém sem os limites de capacidade.
- 10. Limites de Capacidade: informar os limites de capacidade das instalações, que servirá como dado de entrada para a rotina Problema do Transporte do modelo SIG, de forma a se ter um problema balanceado.
- 11. Problema do Transporte: a saída da rotina Localização de Facilidades e os de limites de capacidade serão os dados a entrada para executar a rotina Problema do Transporte do SIG.
- 12. Realoca conforme capacidade: a rotina Problema do Transporte irá realocar os clientes às instalações conforme os limites de capacidade das mesmas, permitindo a fragmentação da demanda dos clientes.
- 13. Solução numérica e gráfica do SIG: após executar as duas rotinas anteriores, o SIG irá gerar a solução numérica e gráfica para o problema de localização-alocação de instalações.

Fase IV: Modelo PLIM para localização-alocação de instalações

14. Modelo PLIM para localização: a partir da matriz de distâncias fornecida pelo SIG, dos dados de demanda e oferta e dos limites de capacidade, executar o modelo PLIM.

- 15. Localiza e aloca conforme capacidade: como solução, o modelo PLIM irá informar as melhores localizações e alocar a demanda à oferta, respeitando os limites de capacidade das instalações, sendo todas a decisões tomadas de forma simultânea.
- 16. Solução numérica do modelo PLIM: a solução numérica do modelo PLIM será transferida para planilha eletrônica do Excel.
- 17. Solução Gráfica do modelo PLIM: a fim de gerar a solução gráfica do modelo PLIM, o mesmo fará interação com o SIG, para posterior análise e comparação dos resultados.

Fase V: Avaliação da qualidade das soluções

- 18. Comparar as soluções: as soluções geradas por cada um dos modelos, SIG e PLIM, para cada um dos cenários simulados, serão comparadas, a fim de se avaliar a qualidade da solução SIG em termos de precisão, e a eficácia da mesma, em termos de tempo de processamento para geração do resultado.
- 19. Analisar os resultados: depois de gerados os resultados dos modelos, os mesmos serão analisados para cada alternativa de simulação.

A Figura 5.3 ilustra a sequência das fases da metodologia adotada, e a Figura 5.4 apresenta as etapas da mesma, de forma esquematizada.

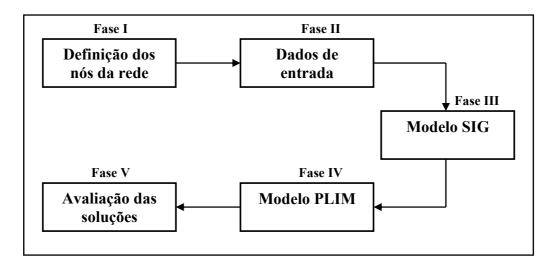


Figura 5.3 – Fases da metodologia de pesquisa

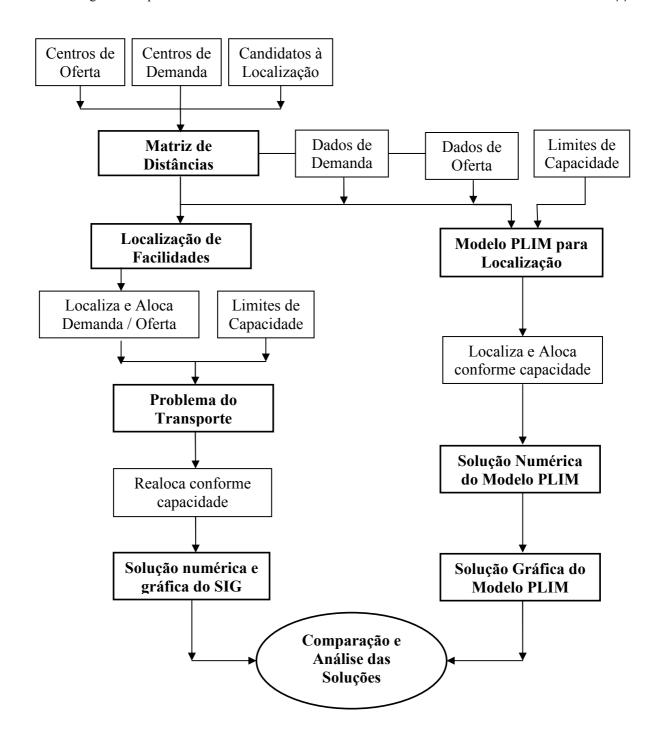


Figura 5.4 – Etapas da metodologia de pesquisa

A metodologia de pesquisa apresentada será posta em prática em três aplicações distintas, cada uma delas envolvendo individualmente dois elos da cadeia logística. A cadeia logística, em um menor nível de detalhamento, pode ser representada por quatro elos: fornecimento, produção, distribuição e clientes, com os respectivos fluxos de produtos ou serviços, conforme mostra a Figura 5.5.

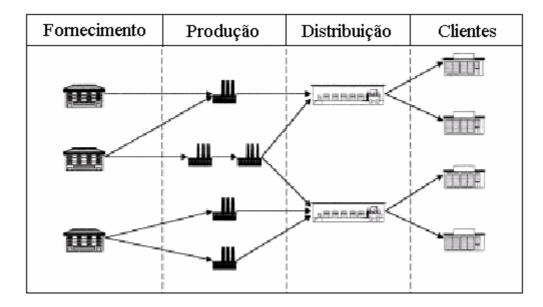


Figura 5.5 – Principais elementos da cadeia logística

As três situações práticas, nas quais o problema de localização-alocação de instalações será simulado, são propostas com base em diferentes níveis de complexidade, medido em função do número de pontos na rede, que quantifica as instalações e respectivos clientes.

- (1) Simulação I: simulação fictícia, com dados geográficos reais aplicados a situações hipotéticas, envolvendo o fluxo de transporte entre fábricas e clientes. Será considerado como um problema de pequeno porte, pois envolve a localização e alocação entre 18 clientes às fábricas existentes e candidatas.
- (2) Simulação II: simulação em um atacadista, tendo por objetivo a minimização dos custos de transporte entre centros de distribuição e respectivos clientes varejistas. Simulação considerada de médio porte por envolver, inicialmente, a alocação entre um centro de distribuição existente e 311 clientes, cada qual com suas respectivas demandas.
- (3) Simulação III: simulação de localização e distribuição entre centros de produção, representados por creches, e clientes, representados pelos respectivos alunos. Considerada uma simulação de grande porte, por envolver um problema com 10 creches existentes e 1.014 alunos, cada qual com uma demanda unitária.

De forma geral, o problema de localização-alocação abordará a minimização de custos de transporte em uma rede logística, em que os centros de oferta (ou de distribuição) deverão atender totalmente às demandas dos clientes, estando sujeitos à restrição de limite superior de capacidade das instalações. Os dados de entrada para análise são: as localizações geográficas dos centros de oferta e de demanda, em termos de latitude e longitude; a malha viária que

cobre a região em estudo, a partir do qual serão calculadas as distâncias entre os pontos de oferta e demanda, representando os custos de transporte; as previsões de demanda dos clientes; os locais candidatos à localização de novas instalações; e os limites máximos de capacidade das instalações.

5.3 Classificação da metodologia de pesquisa

A metodologia de pesquisa adotada neste trabalho pode ser classificada como uma pesquisa científica de natureza aplicada, segundo abordagens qualitativas e, principalmente, quantitativas, com objetivos exploratórios e utilizando-se da modelagem e simulação como procedimento técnico (SILVA & MENEZES, 2005; BERTRAND & FRANSOO, 2002). A Figura 5.6 apresenta a classificação metodológica abordada nesta pesquisa científica.

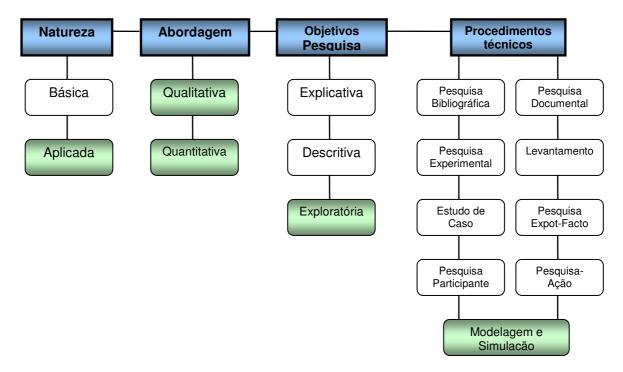


Figura 5.6 – Classificação da pesquisa científica

A pesquisa classifica-se como de natureza aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos para a aplicação prática a problemas específicos de localização de instalações para empresas

dos setores público ou privado que almejam executá-los. Quanto à abordagem, pode dizer que possui enfoque tanto quantitativo como qualitativo. A abordagem será principalmente quantitativa, dada quando informações são transformadas em números e então comparadas e analisadas. A abordagem qualitativa é descritiva e tem como elementos básicos a interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados. Do ponto de vista de seus objetivos, a pesquisa pode ser classificada como exploratória, pois visa proporcionar maior familiaridade com o problema de localização-alocação de instalações, com vistas a torná-lo explícito, segundo os dois modelos desenvolvidos.

Quanto ao procedimento técnico, aplicou-se a Modelagem e Simulação. Segundo Bertrand e Fransoo (2002), a modelagem e simulação é um método de pesquisa principalmente quantitativo, que deve ser usado quando se deseja prever o efeito de mudanças no sistema ou avaliar seu desempenho ou comportamento futuros. Diz-se que um modelo é quantitativo quando há uma relação entre duas variáveis, uma dependente e outra independente. O que se deseja saber é o quanto a variável independente interfere ou explica a variável dependente. Modelos quantitativos são utilizados quando se pretende construir modelos objetivos que explicam o comportamento de processos operacionais, ou parte destes, ou que podem capturar parte dos problemas de tomada de decisão, enfrentados por gerentes no processo industrial.

A principal razão ao se utilizar o método é que este permite a análise do problema, a fim de encontrar soluções matemáticas ótimas, ou próximas ao ótimo global. É utilizado na resolução de problemas reais durante o gerenciamento de operações. Este gerenciamento envolve os processos de projeto, planejamento, controle e operação, em indústrias de manufatura ou de serviços. Os problemas são formulados em termos matemáticos, e técnicas matemáticas são utilizadas para análise e solução. A maior vantagem na aplicação do método é que a solução do modelo tem a capacidade de auxiliar os tomadores de decisão no momento de suas escolhas.

A seguir, no capítulo 6, a metodologia de pesquisa apresentada será posta em prática para as três aplicações propostas, segundo os modelos SIG e PLIM, comparando e analisando suas soluções para o problema de localização-alocação de instalações.

6 Modelagens e Simulações

A metodologia definida no capítulo anterior foi posta em prática para três aplicações distintas, ilustrando problemas de complexidade diferentes. A primeira aplicação é uma simulação entre fábricas e clientes, denominada Simulação I, que compreende o estado de São Paulo e 18 de seus principais municípios. A Simulação II foi desenvolvida com dados reais de um atacadista que opera no sul de Minas Gerais e estado de São Paulo, na qual se fez o estudo de localização para centros de distribuição e alocação para os clientes. Na Simulação III o objetivo foi o de localizar creches na cidade de São Carlos (SP) para atender a demanda dos alunos matriculados. Nestas três simulações, a função objetivo habilitada em ambos modelos, SIG e PLIM, foi a de minimizar os custos de transporte, obtendo as distâncias mínimas entre os centros de demanda e oferta. Procedeu-se às comparações e posterior análises das soluções geradas pelos modelos SIG e PLIM, para o problema de localização-alocação de instalações.

Para suportar os cálculos dos modelos, foi utilizado um computador com processador AMD Sempron 2.600, de 1.83GKz e 512MB de memória RAM, operando sob o sistema operacional Microsoft Windows XP Professional 2002, para as três simulações propostas.

6.1 Simulação I: localização e alocação entre fábricas e clientes

Nesta primeira simulação, a pesquisa irá propor um estudo de localizações e respectivas alocações em um problema fictício, com dados geográficos reais aplicados a situações hipotéticas. O problema é dito fictício por não corresponder à prática de uma empresa específica, sendo algumas informações obtidas de forma hipotética. Cabe ressaltar que o principal objetivo desta pesquisa é avaliar a qualidade de solução do modelo SIG, quando comparada à solução ótima do modelo PLIM, realizando uma interação entre os mesmos. Em diversas situações de simulação foram utilizadas hipóteses simplificadoras, algumas das quais provavelmente não traduziam com exatidão situações reais. Elas foram, no entanto, absolutamente necessárias para que se pudesse efetivamente concretizar os objetivos da pesquisa, tendo em vista a escassez de alguns dados e informações, tendo sido aplicadas as

mesmas hipóteses simplificadoras aos dois modelos, SIG e PLIM. Vale ressaltar que isso não chega a ser um problema em termos teóricos, uma vez que a prioridade aqui é demonstrar a possibilidade e o potencial para a aplicação da metodologia proposta.

Como já abordado, para a formulação e resolução de um problema de localizaçãoalocação de instalações, os principais dados necessários compreendem os dados de demandas, relacionados aos clientes, e dados de localização geográfica, relativos aos pontos fornecedores, distribuidores, clientes e candidatos à localização de novas facilidades, dependendo da aplicação. Para esta simulação, os dados relacionados à quantidade de clientes, suas respectivas demandas, a existência ou não de instalações em operação em pontos da rede e suas respectivas capacidades máximas de oferta são informações hipotéticas. Embora estes dados sejam fictícios, as coordenadas de todos os pontos, sejam eles de oferta ou de demanda, expressa em termos de latitudes e longitudes, compondo a camada de pontos do *software* SIG para esta simulação, vieram de trabalho anterior (LIMA, 2003), assim como a camada de linhas, que representam as rodovias que interligam os pontos, formando a malha viária de transporte, pela qual se dará o fluxo de produtos. A representação de uma malha viária de transporte por uma camada de linhas significa uma simplificação, proporcionando, dessa forma, o uso de toda a conceituação relacionada às operações em redes, tais como conectividade, distância mínima ou menor caminho entre dois pontos quaisquer.

O problema proposto para esta simulação é realizar a localização e respectiva alocação entre pontos de oferta e de demanda, sendo estes os dois elos da cadeia logística considerados para análise. Este estudo se dará no estado de São Paulo, englobando 18 de seus principais municípios, escolhidos entre aqueles considerados de médio e grande porte, distribuídos por toda extensão territorial do estado. A representação gráfica do problema abordado, obtido a partir do mapa gerado pelo *software* SIG utilizado, pode ser visualizada na Figura 6.1.

Para se ter um problema de localização-alocação, faz-se necessário a definição de alguns parâmetros, essenciais na formulação do problema. No mapa da Figura 6.1 está presente a camada de pontos, indicando a localização dos centróides dos municípios considerados, doravante denominados municípios-clientes, além da camada de linhas, representando as principais rodovias que interligam estes municípios. O pressuposto é que cada um destes municípios-clientes represente a localização pontual de uma gama de clientes existentes no interior de cada município. Assim, o valor de demanda de cada município-cliente representaria a soma total das demandas dos vários clientes existentes em seu interior.

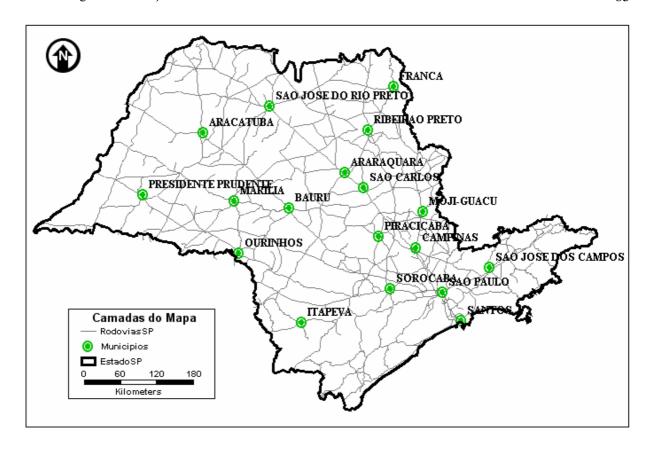


Figura 6.1 – Representação da região para Simulação I

Uma vez definidos os clientes, parte-se para o planejamento de localização e alocação de instalações para suprir a demanda relacionada. Estas instalações podem ser centros de produção, como fábricas e indústrias, ou centros de distribuição, como atacadistas ou varejistas, ou qualquer outra instalação física, pública ou privada, presente em qualquer elo da cadeia de suprimentos. Adotou-se, para esta simulação, que as instalações a serem localizadas constituam centros de produção: existe uma certa demanda por um determinado produto, representada pela demanda dos municípios-clientes, e almeja-se localizar fábricas para a produção deste produto.

Para se localizar os centros de produção, a escolha se dará em um espaço discreto de pontos candidatos à localização de facilidades, que pode incluir todos os municípios presentes na região. Por hipótese simplificadora, adotada tanto para o modelo SIG quanto para o modelo PLIM, farão parte destas possíveis localizações todos os municípios-clientes, ou seja, onde há demanda, há também um local potencial à abertura de novas facilidades. Sendo assim, serão considerados os 18 pontos como candidatos à abertura de instalações. A lista dos municípios-clientes e candidatos potenciais à instalação de fábricas, suas coordenadas geográficas e demandas, são apresentadas no Quadro 6.1. As coordenadas geográficas são as

coordenadas reais dos pontos, e as demandas foram obtidas de forma a manter uma proporcionalidade ao porte demográfico de cada município (por exemplo, o município de São Paulo, que tem o maior índice populacional, possui também a maior demanda associada). Esta consideração no valor da demanda não influencia no tratamento do problema, uma vez que foram considerados os mesmos valores para ambos os modelos, SIG e PLIM. A demanda pode representar, por exemplo, a demanda mensal, em toneladas, de cada município cliente. A soma das demandas consideradas corresponde a um total de 167 SKU.

Município Cliente	Longitude	Latitude	Candidato?	Demanda
Moji-Guaçu	-46942222	-22372222	sim	5
São Carlos	-47890833	-22017500	sim	5
Marília	-49945833	-22213889	sim	6
Presidente Prudente	-51388889	-22125556	sim	7
Araraquara	-48175556	-21794444	sim	7
Franca	-47400833	-20538611	sim	9
Bauru	-49060556	-22314722	sim	10
Piracicaba	-47649167	-22725278	sim	11
São José do Rio Preto	-49379444	-20819722	sim	12
Sorocaba	-47458056	-23501667	sim	12
Santos	-46333611	-23960833	sim	13
Ribeirão Preto	-47810278	-21177500	sim	13
São José dos Campos	-45886944	-23179444	sim	14
Campinas	-47060833	-22905556	sim	14
São Paulo	-46636111	-23547500	sim	20
Ourinhos	-49870556	-22978889	sim	2
Araçatuba	-50432778	-21208889	sim	5
Itapeva	-48875556	-23982222	sim	2

Quadro 6.1 – Características dos municípios-clientes da Simulação I

6.1.1 Problema de localização-alocação no modelo SIG

De posse das camadas que representam os pontos de demanda, que são também os pontos candidatos à localização de instalações, e as principais rodovias que interligam estes pontos, todas elas integradas ao SIG, o primeiro passo para resolver o problema de localização-alocação de instalações é a criação de uma rede, dentro do próprio *software*, para que seja possível efetuar todas as operações baseadas em conceitos de redes. A definição da rede é o ponto de partida para estudos espaciais, modeladas por arcos conectados a nós, formando, assim, a malha viária (de rodovias) responsável pela representação das possíveis rotas por onde passam fluxos de produtos, quando transportados de um local para outro. As

informações contidas na rede são fundamentais para aplicações em estudos espaciais de localização de instalações.

Já definida a rede, segue-se para a geração da matriz de custos de transportes, que armazena as distâncias mínimas entre pares de pontos, geradas pelo algoritmo de rotas mínimas, embutido no próprio *software*. Como se tem um total de 18 pontos, todos eles clientes e candidatos à abertura de uma nova unidade produtiva, a matriz de custos gerada terá dimensões 18x18 (18 linhas, representando os candidatos à localização, por 18 colunas, representando os municípios-clientes). Esta matriz de custos é a base para se executar a rotina Localização de Facilidades do SIG.

A principal idéia ao se utilizar sistemas de simulação é a possibilidade de geração de alternativas diferentes, estabelecendo-se diversos cenários em função de algum critério prédefinido, para posterior comparação e análise dos resultados. Dentro da rotina Localização de Facilidades, programou-se inicialmente para localizar uma única fábrica, de tal forma que esta suprisse a demanda total dos clientes (constituindo o Cenário 1 de simulação). A função objetivo habilitada no *software* foi a de minimizar o custo médio de serviço, medido a partir da matriz de custos previamente gerada, ponderada pelas demandas individuais atribuída aos municípios-clientes. Esta ponderação por demandas funciona como um fator de atração na função objetivo. Quanto maior a demanda, maior é a probabilidade da fábrica se situar próximo àquele cliente.

Ao se realizar a rotina de Localização de Facilidades, o SIG gera um relatório de respostas, com informações a respeito dos resultados da simulação. Uma informação importante contida neste relatório diz respeito à mensuração do custo médio de serviço oferecido, medido em termos das distâncias percorridas. Para o Cenário 1 simulado, a distância média percorrida entre a fábrica e os municípios-clientes ficou na ordem de 209Km (presente na Tabela 6.1).

Para se obter cenários alternativos de simulação, outra hipótese foi formulada. A rotina Localização de Facilidades foi executada de forma a estabelecer o total de fábricas necessária para atender a demanda dos clientes a um custo médio de transporte inferior a 100km, caracterizando um problema de cobertura. Geralmente, quanto menor a distância entre centros de oferta e demanda, maior é o nível de serviço prestado ao cliente. Depois de executada, a rotina identificou que para atingir este objetivo seria necessária a abertura de 3 novas fábricas, além da já identificada no Cenário 1. Sendo assim, novos cenários de simulação são propostos à medida que se abre uma nova unidade, até atingir o total de instalações definida no

problema de cobertura, situação esta obtida no Cenário 4 de simulação. A descrição dos cenários simulados está disposta no Quadro 6.2.

Nota-se que esta é mais uma das suposições feitas nesta simulação, e que outras considerações poderiam ter sido feitas, dependendo da abordagem que se queira dar ao problema. Novos cenários de simulação foram sendo gerados, com a inclusão de novas unidades, que tiveram, como dado de entrada, a existência da fábrica já instalada no Cenário 1. Como já discutido, a existência de uma facilidade reflete diretamente no estudo de localização de outras facilidades, aumentando a complexidade do problema. A função objetivo habilitada nos cenários alternativos, assim como no Cenário 1, foi a de minimizar o custo médio de serviço de transporte. Informações adicionais sobre os resultados gráficos dos cenários gerados podem ser obtidas na Figura 6.2 e os resultados numéricos na Tabela 6.1.

Cenário 1	Abertura de 1 instalação para suprir toda a demanda.
Cenário 2	Abertura de 1 nova unidade, perante a existência da fábrica localizada no Cenário 1.
Cenário 3	Abertura de 2 novas unidades, perante a existência da fábrica localizada no Cenário 1.
Cenário 4	Abertura de 3 novas unidades, perante a existência da fábrica localizada no Cenário 1.

Quadro 6.2 - Definição dos cenários da Simulação I

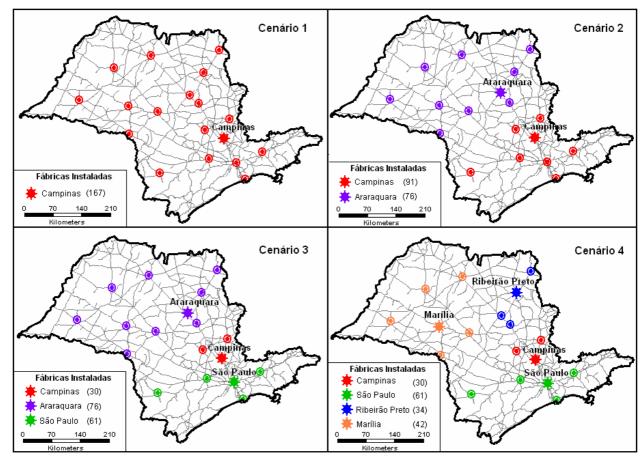


Figura 6.2 – Soluções geradas pela rotina Localização de Facilidades

	Características			Localização d	e Facilidades	Problema do Transporte	
Cenário	Fábrica Existente	Novas Fábricas	Total Fábricas	Custo Médio (Km)	Custo Total (km)	Capacidade Máxima	Custo Total (Km)
1	0	1	1	209,3	34.954	167	34.954
2	1	1	2	142,1	23.740	84	24.034
3	1	2	3	117,4	19.609	56	22.177
4	1	3	4	93,3	15.591	42	16.913

Tabela 6.1 – Soluções geradas no modelo SIG para Simulação I

A Figura 6.2 ilustra os diferentes cenários e suas soluções gráficas correspondentes, geradas pela rotina Localização de Facilidades. Nesta Figura, para cada cenário simulado, além das localizações geográficas das fábricas, têm-se também as alocações entre estas fábricas e respectivos clientes. Além das soluções gráficas, estas informações são também geradas no relatório de saída da rotina.

A Tabela 6.1 mostra os resultados numéricos para as rotinas Localização de Facilidades e Problema do Transporte, simuladas sob as mesmas condições. Descrevem-se as características gerais dos cenários simulados, indicando o total de fábricas consideradas; o Custo Médio e o Custo Total, medidos em Km, para a rotina Localização de Facilidades; a Capacidade Máxima imposta a cada uma das fábricas instaladas e o Custo Total, também em Km, gerado pela rotina Problema do Transporte. Os valores de Custo Total mensuram as distâncias para transportar cada unidade de demanda do centro de oferta ao centro cliente, desconsiderando-se o roteamento de veículos e o percurso de volta cliente-fornecedor. Por uma simplificação na rede viária deste problema, não foram consideradas as restrições de tráfego em vias de mão única e vias de mão dupla. Sendo assim, aquele caminho de menor custo para a viagem de ida (fornecedor-cliente) será o mesmo caminho para a viagem de volta (cliente-fornecedor).

O mapa da Figura 6.2 que representa o Cenário 1 de simulação indica a localização de uma nova unidade de produção, aberta no município de Campinas. Esta unidade estará responsável por suprir o somatório das demandas, englobando todos os municípios-clientes, inclusive a demanda existente em Campinas, somando um total de 167 unidades (valor entre parênteses na legenda do mapa indicado na Figura 6.2). Esta também deverá ser a capacidade máxima de operação desta instalação, não sendo necessário executar a rotina Problema do Transporte para este cenário, uma vez que a capacidade da fábrica já está definida (corresponde ao total das demandas), sendo dispensável também proceder à realocação das demandas, já que a instalação é única e deverá atender a demanda total de clientes. Esta

constatação pode ser averiguada na Tabela 6.1, analisando o Cenário 1 de simulação, no qual a variável Custo Total do serviço para as rotinas Localização de Facilidades e Problema do Transporte não se alterou.

A rotina Localização de Facilidades embutida no SIG foi formulada pelo fabricante do *software* de maneira que um centro de oferta possa atender vários centros de demandas, porém um centro de demanda, representado aqui pelo município-cliente, será abastecido por um único centro de oferta, como pode ser visto nas alocações ilustradas nos mapas da Figura 6.2. Como esta não é uma prática comum no mercado atual, onde um cliente pode ter sua demanda atendida por mais de um fornecedor, a rotina Problema do Transporte, por permitir esta fragmentação de demandas, deve ser executada na seqüência. A saída da rotina Localização de Facilidades se torna a entrada da rotina Problema do Transporte. Esta rotina, além de permitir a fragmentação das demandas, possui a particularidade de impor um limite máximo de capacidade de oferta às instalações.

Na rotina Problema do Transporte, para se definir as capacidades máximas de oferta das fábricas, adotou-se, para esta simulação, a hipótese de que a distribuição de capacidade entre as fábricas instaladas seja homogênea. Assim, todas as instalações, incluindo aquela já existente em Campinas, terão as mesmas capacidades máximas, e a soma total das capacidades das instalações será igual à soma total das demandas, obtendo-se assim um problema balanceado. Nota-se que esta é apenas mais uma consideração feita nesta simulação, e que a mesma pode não corresponder à prática, sendo que para a simulação de problemas reais de localização, pode-se atribuir qualquer valor de capacidade máxima às instalações, ou mesmo não impor qualquer limite. Alguns fatores que podem interferir na capacidade física de uma instalação são, por exemplo, restrições orçamentárias, políticas ou mesmo ambientais, como a disponibilidade e custo do solo, a capacidade da frota de veículos alocada àquela instalação ou o espaço físico de armazenagem.

Como se pode perceber pela análise da Tabela 6.1, os valores de Custo Total de serviço, presentes nas rotinas Localização de Facilidades e Problema do Transporte, decrescem à medida que os cenários de simulação evoluem. Isto ocorre porque quanto maior o número de fábricas instaladas, maior será também a proximidade destas unidades aos clientes, reduzindo os custos de transporte (representada pela variável Custo Total) e melhorando o atendimento ao cliente. Percebe-se que a economia obtida ao se deixar de construir uma fábrica reduzirá as chances de oferta dos produtos ou serviços, denotando, desta forma, a difícil conciliação entre a compensação (*trade-off*) fatores econômicos e satisfação dos clientes.

Analisando as soluções geradas pela rotina Problema do Transporte, que realocou as demandas conforme as capacidades máximas das fábricas, permitindo sua fragmentação (um centro de demanda podendo ser atendido por mais de um centro de oferta) percebe-se um aumento no valor do Custo Total (nos cenários 2, 3 e 4), se comparada àquela solução gerada pela rotina Localização de Facilidades, dentro do mesmo cenário simulado. Este aumento no valor do Custo Total se dá justamente como consequência dos limites de capacidade máxima de oferta imposta às instalações pela rotina Problema do Transporte. Uma vez atingido este limite de capacidade, não poderá mais haver demanda associada àquela instalação, mesmo que seja aquela a solução de menor custo de transporte. Assim, os custos relacionados às distâncias percorridas irão aumentar, explicando o aumento do valor da variável Custo Total de serviço prestado aos clientes na rotina Problema do Transporte, em relação à rotina Localização de Facilidades.

O Custo Total da rotina Problema do Transporte representa a custo total final do problema de localização-alocação de instalações gerada pelo SIG, para os distintos cenários simulados. Este valor de custo total pode ser entendido como sendo o custo calibrado da solução gerada pela rotina Localização de Facilidades, desde que esta rotina também tem por objetivo a redução dos custos de transporte, porém desconsiderando os limites de capacidade das instalações.

Outra informação importante relacionada à eficácia de solução do modelo diz respeito ao tempo de processamento computacional consumido pelo *software* SIG. Constatou-se que, para gerar qualquer um dos cenários simulados, em ambas rotinas, Localização de Facilidades e Problema do Transporte, o tempo de processamento computacional foi da ordem de 1 segundo. O próximo passo da pesquisa é gerar soluções para estes mesmos cenários simulados, conforme o modelo baseado em Programação Linear Inteira Mista (PLIM), proposta como modelo externo ao SIG, e comparar as soluções geradas entre o modelo heurístico SIG e o modelo exato PLIM.

6.1.2 Problema de localização-alocação no modelo PLIM

No escopo da pesquisa propõe-se uma interação entre o SIG e o modelo de Programação Linear Inteira Mista (modelo PLIM), nos momentos de entrada e saída de dados. O modelo

PLIM irá executar os mesmos cenários propostos no modelo SIG, sob os mesmos parâmetros e variáveis, com a mesma função objetivo e restrições. O objetivo é proceder à comparação entre as duas abordagens, uma heurística (modelo SIG) e outra exata (modelo PLIM), para resolução do problema de localização-alocação de instalações proposto, gerando soluções para os mesmos cenários, a partir das mesmas características.

A interação inicial que o modelo PLIM faz com o SIG é necessária para a obtenção da matriz de custos de transportes, que armazena as distâncias entre pares de pontos de oferta e demanda presentes na rede. Esta é uma informação crucial para a resolução de problemas de localização, e é facilmente obtida pelo *software* SIG, através de sua rotina interna de caminhos mínimos, que calcula a menor distância entre dois pontos quaisquer, percorrida através da rede viária presente.

Em posse da matriz de custos, dos dados de demanda dos clientes e informações à respeito de instalações existentes, locais candidatos à abertura de novas instalações e capacidades máximas de oferta das instalações, procede-se à execução do modelo PLIM, formulada conforme descrito na Seção 5.1.1, para cada um dos cenários previamente gerados no modelo SIG. A Tabela 6.2 mostra as características e os resultados numéricos dos cenários simulados com a modelagem PLIM. Esta tabela apresenta dois resultados de Custo Total para a simulação em cada um dos cenários: um primeiro, desconsiderando a restrição de capacidade de oferta das instalações; e um segundo, levando em consideração esta restrição. Através destas duas simulações para cada cenário distinto, pode-se proceder à comparação entre os resultados dos modelos SIG e PLIM. De forma geral, a simulação "Sem restrição de capacidade" do PLIM correspondente à rotina Localização de Facilidades do SIG, e a simulação "Com restrição de capacidade" do PLIM correspondente à rotina Problema do Transporte do SIG. Cabe lembrar que os limites de capacidade máxima de oferta adotados no PLIM foram os mesmos utilizados na rotina Problema do Transporte do SIG.

	Características		Sem restrição d	e capacidade	Com restrição de capacidade	
Cenário	Fábrica Existente	Novas Fábricas	Tempo Computacional	Custo Total (Km)	Tempo Computacional	Custo Total (Km)
1	0	1	00:00:01	34.954	00:00:01	34.954
2	1	1	00:00:01	23.740	00:00:01	24.034
3	1	2	00:00:01	19.609	00:00:01	20.597
4	1	3	00:00:01	15.591	00:00:01	16.660

Tabela 6.2 – Soluções geradas no modelo PLIM para Simulação I

Procedendo-se à execução do problema, a função objetivo do PLIM gerou os resultados armazenados na variável "Custo Total", destacada na Tabela 6.2, para os cenários "com" e "sem" a restrição de capacidade. Esta variável representa, assim como no modelo SIG, para fins comparativos, a soma das distâncias entre a totalidade de pontos de demanda alocados aos pontos de oferta. Além desta informação, a tabela apresenta também o tempo de processamento computacional consumido pelo modelo PLIM para execução das simulações dos cenários, sendo todos eles equivalentes a 1 segundo.

Tendo resolvido o problema de localização-alocação de instalações segundo a abordagem PLIM, faz-se novamente necessária a interação com o *software* SIG, para propiciar a visualização gráfica dos resultados gerados. A Figura 6.3 mostra as indicações das localizações das fábricas abertas através de mapas, em um primeiro instante, sem a restrição de capacidade e, em um segundo momento, incluindo a restrição de capacidade das instalações, para os cenários 3 e 4 simulados. Os mapas não indicam as alocações entre os pontos de demanda e oferta, devido à possibilidade de fragmentação da demanda.

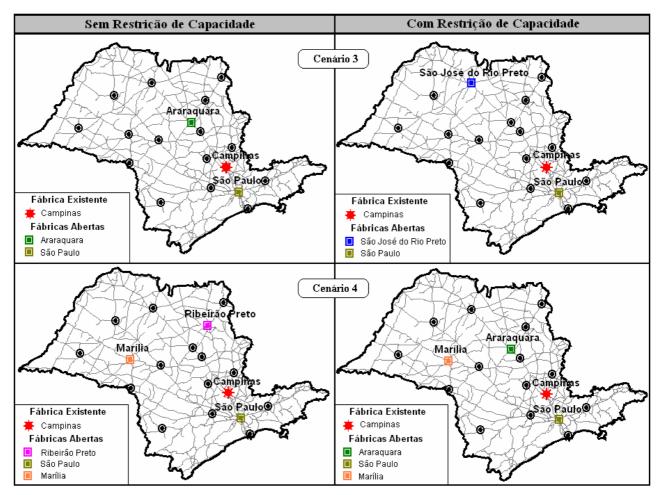


Figura 6.3 – Soluções geradas pelo modelo PLIM para os Cenários 3 e 4

Não foram gerados os mapas para as simulações dos Cenários 1 e 2 do modelo PLIM, por serem idênticos aos cenários equivalentes, gerados no modelo SIG, já apresentados anteriormente. Esta afirmação pode ser verificada comparando-se a semelhança entre os valores de Custo Total presentes nas soluções dos dois modelos, SIG e PLIM, para os cenários correspondentes, presentes nas Tabelas 6.1 e 6.2. Porém, para os Cenários 3 e 4, as localizações (e conseqüentemente as alocações) para as simulações "com" e "sem" a restrição de capacidade geraram soluções distintas dentro do próprio modelo PLIM, como pode ser observado comparando-se os mapas da Figura 6.3.

Nos Cenários 3 e 4, percebe-se pelos mapas da Figura 6.3, as diferentes localizações para as simulações "com" e "sem" restrição de capacidades do modelo PLIM. Quando não se restringe a capacidade de oferta da instalação, as localizações das fábricas se dão em locais distintos quando esta restrição é acionada. O próximo tópico se dedica a fazer uma comparação entre as soluções dos modelos SIG e PLIM para o problema de localização-alocação de instalações.

6.1.3 Comparação dos resultados gerados entre os dois modelos

Comparando as soluções geradas pelos modelos SIG e PLIM, nota-se que, em um primeiro momento, os dois modelos se comportaram de forma semelhante. As soluções produzidas pelo SIG, em sua rotina Localização de Facilidades (LF), foram iguais às soluções geradas pelo modelo PLIM, em sua rotina "Sem restrição de capacidade" (SRC), para os 4 cenários simulados. Este aspecto pode ser visto comparando-se os valores da variável Custo Total (Km), disponíveis na Tabela 6.3, para a rotina LF do modelo SIG e rotina SRC do modelo PLIM. Além da solução numérica, pode-se também auferir esta constatação pela comparação das soluções gráficas dos modelos, geradas pelo SIG, onde as fábricas foram instaladas nos mesmos locais para as rotinas LF e SRC.

Partindo para a comparação entre o modelo SIG em sua rotina Problema do Transporte (PT), que não permite alterar a localização das fábricas obtidas pela rotina Localização de Facilidades, e o modelo PLIM, em sua rotina "Com restrição de capacidade" (CRC), percebese, através da comparação entre os mapas correspondentes, apresentados nas Figuras 6.2 e 6.3, que as soluções de localização dos Cenários 3 e 4 foram diferentes entre os dois modelos.

Para o cenário 3 de simulação, o modelo SIG localiza-se uma fábrica em Araraquara, e o modelo PLIM, localiza uma fábrica em São José do Rio Preto. No Cenário 4 de simulação, o modelo SIG localiza uma fábrica em Ribeirão Preto e o modelo PLIM localiza em Araraquara. Estes diferentes locais de instalação das fábricas refletem em maiores ou menores custos de transporte. A Tabela 6.3 resume os valores de "Custo Total" de serviço para os cenários simulados nos dois modelos, e uma comparação percentual entre estes custos.

	Mode	lo SIG	Model	o PLIM	Variação (%)	
	LF	PT	SRC	CRC	LF vs. SRC	PT vs.CRC
	Custo Total	Custo Total				
Cenário	(Km)	(Km)	(Km)	(Km)	(Km)	(Km)
1	34.954	34.954	34.954	34.954	0,0	0,0
2	23.740	24.034	23.740	24.034	0,0	0,0
3	19.609	22.177	19.609	20.597	0,0	7,7
4	15.591	16.913	15.591	16.660	0,0	1,5

Tabela 6.3 - Comparação das soluções dos modelos SIG e PLIM para Simulação I

A Equação 6.1 foi utilizada para o cálculo da porcentagem de variação entre os modelos.

$$Variação (\%) = \frac{Modelo SIG - Modelo PLIM}{Modelo PLIM} *100$$
(6.1)

Percebe-se que houve variações entre os valores de Custo Total dos modelos SIG e PLIM, nos Cenários 3 e 4 de simulação, que reduziu os custos de deslocamentos em 7,7% e 1,5%, respectivamente, em função das distintas localizações para abertura de instalações propostas nestes cenários, e conseqüentemente diferentes alocações. Esta variação receberá uma análise mais criteriosa na seção 6.4.

Outro fato importante que merece ser comparado são os tempos de processamento consumidos pelos modelos SIG e PLIM para geração dos cenários de simulação. Para ambos os modelos, este tempo ficou na ordem de um segundo, ou seja, não constituiu empecilho para a geração das soluções no modelo exato PLIM, se assemelhando ao tempo computacional consumido pelo SIG. Porém, o problema abordado nesta simulação é de pequeno porte. A fim de averiguar a capacidade de solução dos modelos para problemas de maiores complexidades, será proposto, na próxima seção, um estudo de localização-alocação de instalações para um

problema considerado de médio porte, com um maior volume de dados e consequentemente maior número de alternativas de decisão.

6.2 Simulação II: localização e alocação entre centros de distribuição e clientes

Na Simulação II, o objetivo será localizar centros de operações logísticas de distribuição de carga, ou simplesmente centros de distribuição (CD's), para uma empresa atacadista específica. Segundo Enomoto (2005), a principal função do comércio atacadista é melhorar a coordenação entre a produção e centros de consumo, tendo por objetivo nivelar a demanda à oferta e promover o diferencial dos serviços esperados pelos consumidores e aqueles oferecidos pelos fabricantes, de forma direta, denotando assim a importância deste elo na cadeia de suprimentos. O princípio econômico básico que justifica o estabelecimento de um CD, conforme Bowersox e Closs (2001), é a consolidação do transporte. Um CD deve ser incluído somente se proporcionar vantagens de serviço ou de custo, representando parte do esforço de uma indústria para obter utilidade de tempo e local.

A empresa atacadista em questão é um distribuidor de produtos industrializados que opera no Sul de Minas Gerais e estado de São Paulo. A empresa possui um único Centro de Distribuição, de 17.000 m² de área construída, 15.000 m² de área de armazenagem, localizado na cidade de Poços de Caldas, MG. Enomoto (2005) constatou, por meio de entrevistas realizadas junto à empresa, que o CD foi instalado no município de Poços de Caldas por possuir, àquela época, fácil acesso às cidades do estado de São Paulo e de Minas Gerais, porém, sem a realização de estudos mais aprofundados, seguindo apenas a experiência e intuição dos proprietários. Este mesmo autor, após análises de relatórios gerenciais, constatou ainda que o departamento de transporte da empresa responde por 85% dos custos logísticos, totalizando 4,2% do faturamento médio mensal, justificando, assim, um estudo que vise à redução destes custos.

O atacadista possui um total de aproximadamente 12.000 clientes até o ano de 2006, sendo 30% do total presente no Sul de Minas Gerais e 70% distribuídos no interior de São Paulo, concentrados no Vale do Paraíba e regiões de Campinas e Ribeirão Preto. Até a época considerada, a empresa possui frota própria de 220 caminhões e realiza suas entregas em até

48 horas, sendo esta sua principal diretriz estratégica de *marketing*, convicta de que o atendimento no menor prazo representa um diferencial no mercado. O público-alvo é o pequeno e médio varejo, comercializando e distribuindo, em média, 3.000 itens diariamente. Além disto, a empresa conta com cerca de 4.100 fornecedores, presentes em vários estados do Brasil. Para atender seus diversos clientes, a empresa possui uma distribuição física que conta com uma logística baseada no pólo-central, concentrando os produtos recebidos dos fornecedores no CD, localizado em Poços de Caldas e, a partir deste CD, distribuindo os produtos para seus clientes.

6.2.1 Definição de parâmetros e variáveis do modelo

Para resolver o problema de localização-alocação proposto nesta simulação, faz-se necessária a definição de alguns parâmetros e variáveis do modelo, como os dados relacionados ao CD ativo, clientes e candidatos à abertura de novas instalações, as respectivas localizações geográficas, demandas, e capacidade de oferta das instalações.

Os principais dados necessários para viabilizar o estudo de localização de CD's proposto nesta simulação são os dados geográficos e os dados de demanda. Os dados geográficos informam a localização espacial do CD ativo, dos clientes e dos candidatos a possíveis localizações de centros de distribuição. Estes dados são armazenados em termos de latitudes e longitudes para cada nó da rede, tornando possível o cálculo da matriz de custos. Os dados de demanda, por sua vez, informam o volume requerido por cada cliente, a ser suprida pelo CD em operação ou pelos novos CD's a serem abertos. Os dados de demandas são informações de vital importância na obtenção dos custos de transporte, presentes na função objetivo do modelo, formulada em função das distâncias percorridas e ponderada pelos valores de demanda, que funcionam como fator de atração, vinculado ao ponto correspondente, assim como na Simulação I.

O atacadista em questão obtém seus dados de demanda a partir de informações do departamento de vendas, que são então passados para o *Network Routing*, *software* de roteirização utilizado pela empresa. Este *software* agrupou sua base de dados de clientes em 2.086 quadrículas, conforme um zoneamento de regiões, em função do acesso viário e da densidade dos clientes. Estas quadrículas são as menores unidades de agrupamento de clientes

em pontos de referência, podendo representar um cliente, uma praça ou um bairro, evitando assim, a necessidade de georeferenciar toda a gama de clientes. Depois de realizado o agrupamento, para cada quadrícula obtida são determinadas as coordenadas geográficas de seu centróide e o volume de produtos demandado (ENOMOTO, 2005).

Para o estudo de localização proposto nesta simulação, tanto para o modelo SIG quanto para o modelo PLIM, as quadrículas serão agrupadas novamente, formando um conjunto de municípios-clientes, assim como considerado na abordagem anterior. Todas as quadrículas pertencentes ao mesmo município serão reagrupadas, e terão suas demandas somadas em um único ponto, que indica a localização do centro geográfico daquele município-cliente. Este agrupamento foi feito principalmente devido à limitação da malha viária disponível em formato digital no SIG, utilizada nesta pesquisa. Esta camada possui apenas as rodovias que interligam os municípios considerados, não dispondo de informações sobre ruas e avenidas presentes em cada município-cliente. Seria um trabalho em vão a consideração de diversos pontos clientes, localizados em diferentes posições geográficas, uma vez que a camada de rodovias os reduziria a um único ponto geográfico, indicando a localização central daquele município.

No que diz respeito à agregação dos nós de demanda, Lacerda (1999) diz não ser incomum ter que se trabalhar com milhares de clientes, tornando-se quase sempre necessário a agregação de nós clientes. Como o estudo de localização de instalações situa-se no nível de decisão estratégico, onde os dados estão mais agregados e em um nível de detalhamento menor que estudos que envolvem decisões gerenciais ou operacionais, como os estudos de roteirização de veículos, a agregação dos clientes em municípios-clientes está justificada e é aceitável para a abordagem proposta neste trabalho.

Uma vez agrupados os dados, gerou-se um total de 311 municípios-clientes, com suas devidas localizações geográficas e demanda total, sendo que cada município-cliente possui certo número de clientes, em diferentes localidades, dentro de seus limites geográficos. O Quadro 6.3 apresenta alguns dos municípios-clientes considerados, com suas respectivas demandas, assim como o valor da demanda total para os 311 municípios. A relação completa dos municípios considerados pode ser vista no Anexo A.

Nº	Município-Cliente	Demanda (Kg)
1	CAMPINAS	333.907
2	PIRACICABA	115.340
3	ARARAQUARA	69.164
4	POÇOS DE CALDAS	58.681
5	SOROCABA	55.954
6	ITAJUBÁ	45.666
7	LIMEIRA	45.249
•••	•••	•••
311	TOTAL	3.861.936

Quadro 6.3 - Valores de demanda dos municípios-clientes

Para efeito dos estudos de localização proposto nesta pesquisa, foram coletados e analisados os dados de demanda dos clientes em um mês típico. Variações e sazonalidades de demandas não foram levadas em consideração para a construção dos modelos simulados. Como o principal objetivo da pesquisa é fazer uma interação entre o *software* SIG e o modelo PLIM, a fim de avaliar a qualidade da solução gerada pelo modelo SIG, ao tratar o problema de localização-alocação de instalações, a consideração de uma demanda pontual não constitui ponto crítico, uma vez que foi a mesma demanda considerada nos dois modelos.

Com relação aos candidatos à localização de novos CD's, o algoritmo de solução do problema de localização requer a determinação prévia de um conjunto de soluções viáveis. Estas soluções correspondem, na verdade, a um conjunto de locais que serão as possíveis localizações das novas instalações. No caso de um estudo de localização de CD's, este conjunto de locais passa a ser, assim, um conjunto de candidatos a CD's. O modelo estabelece a sua melhor solução, indicando as melhores localizações dentre aqueles candidatos préselecionados. Sendo assim, a melhor solução estará totalmente vinculada a estes candidatos, que serão utilizados como dados de entrada do modelo de localização.

A princípio, todos os municípios-clientes podem fazer parte do conjunto de candidatos à abertura de um novo CD, ou seja, se o modelo possui 311 municípios-clientes, têm-se também 311 candidatos à abertura de novas instalações. Sabe-se que quanto maior o número de candidatos à localização, maiores também são as possibilidades de solução, o que gera um aumento da complexidade do problema e, conseqüentemente, do tempo de resolução do mesmo. Como será destacado nas próximas seções, este parâmetro não constitui um obstáculo para a abordagem heurística do SIG, porém, impõe um limite de capacidade ao modelo exato PLIM, tornando-o, em alguns casos, impraticável. Assim sendo, para os dois modelos, SIG e

PLIM, o número de candidatos a CD's está restrito a 150 pontos, escolhidos entre aqueles municípios-clientes que possuem os maiores valores de demanda, considerados como os principais clientes.

A Figura 6.4 ilustra o problema abordado nesta simulação, demonstrando a região sob estudo, a rede viária considerada, a localização do CD ativo em Poços de Caldas e a distribuição geográfica dos 311 municípios-clientes.

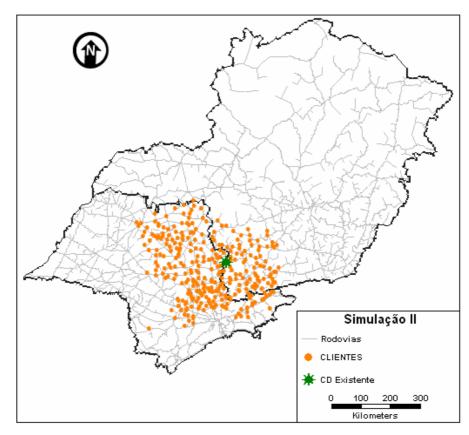


Figura 6.4 – Características do problema da Simulação II

Além dos aspectos previamente discutidos, a metodologia aqui proposta irá considerar, para definição dos limites de capacidade de oferta dos CD's, a mesma hipótese proposta na Simulação I, em que haja um equilíbrio entre as capacidades das instalações. Na Simulação II, propõe-se então que os limites de capacidade sejam definidos em termos do número de instalações ativas e da demanda total dos clientes, de tal forma que as capacidades de oferta sejam divididas proporcionalmente entre as instalações, gerando um problema balanceado, com o total de demanda equivalente ao total de oferta. Com isto, é possível chegar a um valor de limite de capacidade e executar a simulação proposta, nos modelos SIG e PLIM, seguindo para uma posterior comparação e análise dos resultados gerados.

6.2.2 Problema de localização-alocação no modelo SIG

Para resolver o problema de localização segundo a abordagem SIG, novamente as duas rotinas embutidas no *software* SIG serão utilizadas, a fim de se efetuar a localização de instalações e posterior realocação de demandas, conforme os limites de capacidade. Além da forma indireta de abordar o problema, o *software* SIG utilizado possui a peculiaridade de não permitir que facilidades existentes façam parte do conjunto de facilidades candidatas à localização de novas unidades. Uma vez que já exista instalada uma facilidade em determinado ponto da rede, este local não será mais considerado como candidato à abertura de uma nova facilidade. Esta parece ser uma consideração lógica, porém, se o *software* não fizesse essa restrição, seria possível redimensionar a capacidade física das instalações existentes, como, por exemplo, aumentando a sua capacidade instalada, caso fosse indicado para abertura de nova facilidade naquele local.

Outra particularidade do *software* é de não permitir que facilidades existentes sejam também facilidades clientes, formando dois conjuntos exclusivos. Se a região onde está instalada a facilidade possuir demanda, esta será desconsiderada pela rotina de Localização de Facilidades do SIG. Como o problema considerado nesta pesquisa é de minimização dos custos de transportes, esta característica acaba não interferindo no cálculo da solução do problema de localização, pois a distância entre o centro de oferta e de demanda, localizada em um ponto com as mesmas coordenadas geográficas, seria nula, não alterando o valor da função objetivo do modelo, que mensura os custos de transporte relacionados às distâncias. Sendo assim, para a rotina de Localização de Facilidades, desconsiderar a demanda dos clientes, presente no mesmo local geográfico no qual a facilidade está instalada, não geraria distorções na resolução do problema.

Embora esta não seja uma restrição no procedimento de Localização de Facilidades, acaba por gerar inviabilidades na rotina Problema do Transporte, uma vez que a rotina leva em consideração o limite superior de capacidade das instalações, e a demanda associada deve ser considerada e adicionada às demais demandas atendidas pelo CD. Sendo assim, para que a demanda de uma região que possua um CD instalado esteja incluída no cálculo do limite de capacidade do centro de oferta, deve ser criado um artificio para englobar esta demanda.

Esse artificio consiste em gerar um ponto cliente adicional, com as mesmas coordenadas geográficas e a mesma demanda do ponto de oferta, porém com uma identificação diferente

no banco de dados do SIG, inserindo este novo ponto ao conjunto de seleção de nós clientes. Com esta nova indicação, mesmo que possua as mesmas características do nó inicial, será tratado pelo SIG como um novo ponto na rede. Este artificio não gera discrepâncias no cálculo da função objetivo do modelo, já que a distância percorrida entre a facilidade mais próxima e o novo ponto cliente será nula, uma vez que estão situados no mesmo local, com as mesmas coordenadas geográficas. Feito isto, a demanda deste cliente acrescentará no cômputo do limite de capacidade da facilidade associada àquele ponto, contornando o problema.

Esclarecidas estas particularidades do SIG, parte-se para a geração dos cenários a serem simulados, inicialmente no modelo SIG, e posteriormente no modelo PLIM. O critério para geração dos cenários alternativos, assim como na Simulação I, será definido em termos do limite de custo médio de serviço em transporte que se almeja alcançar. Supostamente, desejase que o custo médio de transporte não seja superior a 100 Km. A partir desta restrição, executou-se a rotina Localização de Facilidades para o problema de cobertura, a qual gerou como resposta o total 4 de CD's, incluindo o existente em Poços de Caldas. Com isto, novos cenários foram propostos, por meio da inclusão de novos CD's até se atingir este total de CD's localizados. A descrição dos cenários simulados pode ser encontrada no Quadro 6.4, os resultados gráficos nas Figuras 6.5, 6.6 e 6.7, e os resultados numéricos na Tabela 6.4.

Cenário 1	Alocação dos municípios-clientes ao CD existente em Poços de Caldas, por meio dos caminhos mínimos percorridos entre os pontos oferta/demanda.
Cenário 2	Abertura de 1 novo CD, perante a existência do CD em Poços de Caldas.
Cenário 3	Abertura de 2 novos CD's, perante a existência do CD em Poços de Caldas.
Cenário 4	Abertura de 3 novos CD's, perante a existência do CD em Poços de Caldas.

Quadro 6.4 – Definição dos cenários da Simulação II

As Figuras 6.5, 6.6 e 6.7 descrevem as soluções gráficas para os Cenários 2, 3 e 4 de simulação, respectivamente. O Quadro 6.5 faz o relacionamento entre as letras dos municípios-clientes escolhidos como sede para os novos CD's e seus respectivos nomes, indicados nas figuras que contêm os mapas das simulações propostas.

Letra	Município-Cliente
Α	Poços de Caldas
В	Limeira
С	Pindamonhangaba
D	Campinas
E	Araraquara

Quadro 6.5 – Identificação dos municípios-clientes

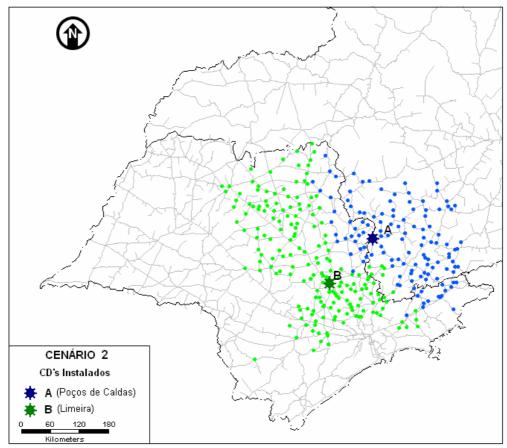


Figura 6.5 – Solução gerada pela rotina Localização de Facilidades para o Cenário 2

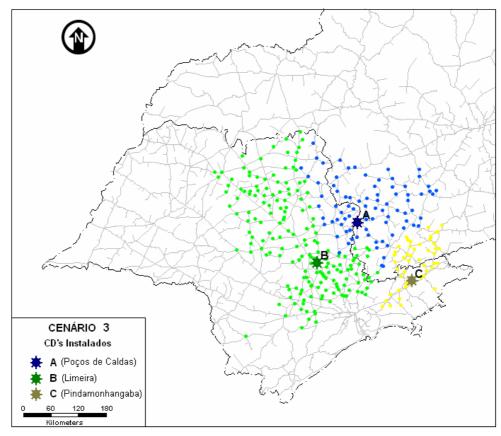


Figura 6.6 – Solução gerada pela rotina Localização de Facilidades para o Cenário 3

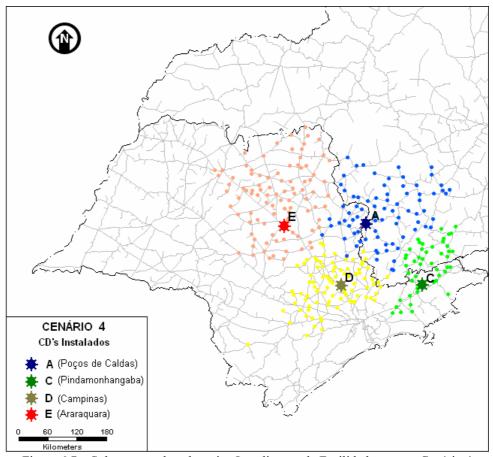


Figura 6.7 – Solução gerada pela rotina Localização de Facilidades para o Cenário 4

A solução gráfica do Cenário 1 de simulação não foi aqui apresentada, pois neste cenário não foi proposta a localização de novas instalações, apenas foi programado para proceder à alocação entre os municípios-clientes o CD existente em Poços de Caldas. O objetivo de simulação deste cenário foi obter o valor inicial do Custo Médio e Custo Total de transporte supostamente praticado pelo atacadista, considerando-se o percurso de ida (fornecedor-cliente), desconsiderando-se o percurso de volta (cliente-fornecedor) e a etapa de roteirização dos veículos. A Tabela 6.4 apresenta os resultados numéricos para os distintos cenários de simulação.

Modelo SIG										
	Loca	alização de Facili	dades	Problema d	Problema do Transporte					
	CD's	Custo Médio	Custo Total	Capacidade	Custo Total					
	Abertos	(Km)	(10 ⁶ Km)	(Kg)	(10 ⁶ Km)					
Cenário 1	Α	212	820	3.861.936	820					
Cenário 2	A, B	121	461	1.930.968	506					
Cenário 3	A, B, C	101	383	1.287.312	503					
Cenário 4	A, C, D, E	83	315	965.484	402					

Tabela 6.4 – Soluções geradas no modelo SIG para Simulação II

Novamente foram obtidos os valores de Custo Total de transporte para as rotinas Localização de Facilidades e Problema do Transporte. Nesta simulação, esta variável possui dimensão da ordem de milhões de quilômetros percorridos. Em um primeiro momento, esta magnitude se deve ao fato de estar se trabalhando em dimensões estaduais, incluindo as regiões de Minas Gerais e São Paulo. Por outro lado tem-se a própria finalidade da variável, que é quantificar a distância total percorrida entre cada um dos 311 municípios-clientes até o CD ao qual foi alocado, a fim de suprir as demandas, ou parte destas. Vale a pena lembrar que este custo de transporte armazenado na variável Custo Total não corresponde ao custo de transporte efetivamente praticado pela empresa, pois, após a alocação, haveria a etapa de roteirização dos veículos para suprir as demandas dos clientes.

A variável Capacidade (Kg) presente na Tabela 6.4 se refere ao limite de capacidade máxima de oferta, imposto como restrição a cada CD em operação. Conforme já discutido, este valor foi calculado de forma a se obter um problema balanceado, em que o total de oferta esteja nivelado ao total de demanda. Quando se abrem novos CD's, este valor de capacidade se divide entre o CD em operação e os novos CD's, de forma equitativa. Vale lembrar que esta foi apenas uma suposição para proceder ao estudo de localização, em face da escassez de informações a respeito das capacidades verdadeiramente requeridas pelo atacadista, e que foram considerados os mesmos valores de capacidade para ambos os modelos, SIG e PLIM.

Analisando-se os valores de Custo Total gerados pela rotina Problema do Transporte presentes na Tabela 6.4, percebe-se que o custo total de transporte com um único CD ativo em Poços de Caldas (Cenário 1) corresponde a 820x10⁶ Km. Ao se abrir um novo CD em Limeira (Cenário 2), o atacadista reduziria seus custos de transporte em 38,3%, se comparando ao Cenário 1. Já para o Cenário 3, no qual são abertas duas novas unidades de CD, este custo se reduz em apenas 38,7% com relação ao Cenário 1, pouco mais vantajoso que o Cenário 2. A redução que se obteria com a abertura de três novos CD's, representada no Cenário 4, seria de 51% comparada ao Cenário 1. O planejador pode decidir que a porcentagem de redução de custos de transportes entre os Cenários 2 e 3 não é viável, visto que terá que instalar uma nova unidade para obter apenas 0,4% de vantagem. Esta pequena redução de custo de transporte não justificaria os custos relacionados à abertura de uma nova unidade de CD.

6.2.3 Problema de localização-alocação no modelo PLIM

Conforme Vallim Filho (2004), a geração de boas soluções para o problema de localização-alocação depende estritamente do conjunto de soluções viáveis para o problema, que correspondem ao conjunto de locais candidatos às possíveis localizações das novas instalações. Estas soluções viáveis irão se constituir na base para a determinação da solução ótima. Sendo assim, a solução do problema será ótima para um dado conjunto de candidatos. Se a seleção de candidatos se altera, a solução ótima também pode se alterar.

Esta é uma situação indesejável do ponto de vista prático, pois ao se resolver um problema, o esperado é que haja alguma garantia de que a solução encontrada é efetivamente a melhor. Não haveria interesse em uma solução que é ótima apenas para um conjunto de candidatos. Busca-se a melhor solução dentre todos os candidatos. A definição de candidatos é, portanto, passo fundamental para o sucesso da metodologia. Ainda segundo Vallim Filho (2004), este é um campo em que a literatura é muito escassa em estudos mais aprofundados, e a questão vem sendo tratada fundamentalmente sob o ponto de vista qualitativo. Por exemplo, Ballou (2006) apontou que modelos discretos de localização selecionam as melhores soluções a partir de uma lista de candidatos pré-selecionados pela sua razoabilidade.

Uma alternativa simplista para esta simulação seria definir todos os nós da rede em estudo como candidatos à instalação de novos CD's. Apesar de ser este o tratamento ideal, pois assim o modelo poderia selecionar os melhores locais dentre todas as alternativas possíveis, esta abordagem não poderá ser aplicada nesta fase do trabalho. Após os clientes terem sido agrupados em 2.086 quadrículas pelo *software* de roteirização do atacadista, e reagrupados em 311 municípios-clientes devido às limitações da camada de rodovias acoplada ao SIG, estes pontos tiveram que ser reagrupados novamente para constituir o conjunto de candidatos a possíveis localizações de CD's. O conjunto de candidatos à localização de CD's dá origem à matriz de distâncias que, após ter sido criada pelo SIG, deve ser armazenada em planilha eletrônica do Excel, que fará interface com o *software* de otimização LINGO.

Embora o tamanho do problema de localização-alocação, relacionado ao número de candidatos a CD's, não tenha sido fator limitante para o LINGO, acabou por gerar restrições à planilha eletrônica do Excel, responsável pelo armazenamento da matriz de distâncias entre os municípios-clientes e os candidatos à abertura dos novos CD's. O LINGO possui uma função interna de leitura de planilhas eletrônicas, que possui suporte para intervalos unidimensionais

ou bi-dimensionais, não sendo capaz de ler intervalos descontínuos ou tri-dimensionais. Sendo assim, a matriz de distâncias não pode ser fragmentada, devendo ser contínua. O *software* Excel, na versão utilizada, possui um total de 65.536 linhas em sua planilha, o que não inviabiliza o tratamento do problema, porém, possui um limite de 256 colunas, o que impossibilita o armazenamento de uma matriz contínua quadrada de dimensão 311 (total de municípios-clientes). Sendo assim, optou-se por manter o total de pontos de demanda, caracterizados pelos 311 municípios-clientes, que serão armazenados nas linhas da matriz, e reduzir o número de locais candidatos à localização de CD's, que ocuparão suas colunas, de forma a possibilitar o armazenamento em planilha do Excel, e a posterior leitura pelo *software* de otimização LINGO.

Sendo assim, para viabilizar esta simulação, foi proposto um novo conjunto de candidatos à localização de CD's, subconjunto dos municípios-clientes. Dobrusky (2003) considerou como candidatos à abertura de novas instalações as localizações mais importantes, ditas como instalações potenciais, constituídas por aquelas que somavam, no caso, 80% do total da demanda. Para esta simulação, serão também considerados para formar o conjunto de candidatos aqueles municípios-clientes responsáveis pelas maiores demandas. Observou-se que a soma das demandas de 150 municípios-clientes são responsáveis por 89% da demanda total, sendo então considerados como os componentes do novo conjunto de locais candidatos. Sendo assim, a matriz de custos tem dimensões 311x150 (clientes X candidatos), tanto para o modelo PLIM como para o modelo SIG, previamente abordado, embora esta não tenha sido restrição para este último modelo, mas de modo a possibilitar a comparação dos modelos perante as mesmas condições. Além disto, a redução do número de variáveis do problema diminui sua complexidade, influenciando diretamente no tempo de processamento computacional de resolução consumido pelo modelo PLIM.

A Tabela 6.5 apresenta os resultados do modelo PLIM para os cenários de simulação já definidos no Quadro 6.4.

Modelo PLIM										
	Sem Re	estrição de Ca	pacidade	Com Restrição de Capacidade						
	CD's	Tempo de Custo Tot		CD's	Tempo de	Custo Total				
	Abertos	Processo	(10 ⁶ Km)	Abertos	Processo	(10 ⁶ Km)				
Cenário 1	Α	00:00:01	820	Α	00:00:01	820				
Cenário 2	A, B	00:00:58	461	A, D	00:01:15	500				
Cenário 3	A, B, C	00:15:38	383	A, F, G	00:33:57	410				
Cenário 4	A, C, D, E	02:44:10	315	A, B, E, F	01:06:05	353				

Tabela 6.5 – Soluções geradas no modelo PLIM para Simulação II

Além da variável Custo Total, a Tabela 6.5 apresenta também o tempo de processamento computacional para as rotinas "Sem Restrição de Capacidade" e "Com Restrição de Capacidade". Percebe-se que com a evolução dos cenários, este tempo vai crescendo. Isto ocorre devido a um aumento na complexidade do problema, com o aumento do número de facilidades a serem localizadas, exigindo assim um maior tempo computacional para sua resolução. Para a simulação do Cenário 4, no qual foi proposta a abertura de três novos CD's perante a existência do CD que opera em Poços de Caldas, consumiu-se um máximo de 2 horas, 44 minutos e 10 segundos para simular a rotina SRC do modelo PLIM.

A Tabela 6.5 apresenta também as indicações dos melhores locais para abertura de CD's, através das respectivas letras (algumas delas resumidas no Quadro 6.5). Como se pode perceber, o modelo PLIM, em sua rotina "Com Restrição de Capacidade", indicou a abertura de CD's em locais distintos à rotina "Sem Restrição de Capacidade", nos Cenários 2, 3 e 4 de simulação. Dois novos locais foram selecionados, F e G, que correspondem aos municípios de Jundiaí e Rio Claro, respectivamente. O próximo tópico apresenta a comparação dos resultados numéricos e gráficos entre as abordagens SIG e PLIM.

6.2.4 Comparação dos resultados gerados entre os dois modelos

Obtidos os resultados de simulação dos cenários propostos, parte-se para a análise comparativa entre as soluções produzidas pelos modelos SIG e PLIM. A Tabela 6.6 apresenta os dados fundamentais para realizar esta comparação. A equação 6.1 apresentada na simulação anterior foi novamente utilizada para o cálculo da porcentagem de variação entre os modelos PLIM e SIG para esta simulação.

	Mode	lo SIG	Model	o PLIM	Variação (%)		
	LF	PT	SRC	CRC	LF vs. SRC	PT vs. CRC	
	Custo Total Custo Total (10 ⁶ Km) (10 ⁶ Km)		Custo Total (10 ⁶ Km)				
Cenário 1	820	820	820	820	0,0	0,0	
Cenário 2	461	506	461	500	0,0	1,4	
Cenário 3	383	503	383	410	0,0	22,6	
Cenário 4	315	402	315	353	0,0	13,8	

Tabela 6.6 – Comparação das soluções dos modelos SIG e PLIM para Simulação II

Pela análise da Tabela 6.6, percebe-se que não houve variação entre as rotinas LF do modelo SIG e SRC do modelo PLIM, que produziram as mesmas soluções de localização de CD's, para todos os cenários simulados, incorrendo nos mesmos custos de transporte. Por outro lado, a rotina CRC do modelo PLIM foi capaz de reduzir em 22,6% e em 13,8% os custos de transporte, se comparado à rotina PT ao modelo SIG, para os Cenários 3 e 4 de simulação, respectivamente. Esta potencialidade do modelo PLIM será analisada posteriormente, na seção 6.4.

As soluções geradas pelos modelos podem ser visualizadas nas Figuras 6.8, 6.9 e 6.10, que mostram as diferentes localizações produzidas pelos modelos SIG e PLIM, para os Cenários 2, 3 e 4 de simulação, o que obviamente gerou os menores custos de transporte para o modelo PLIM.

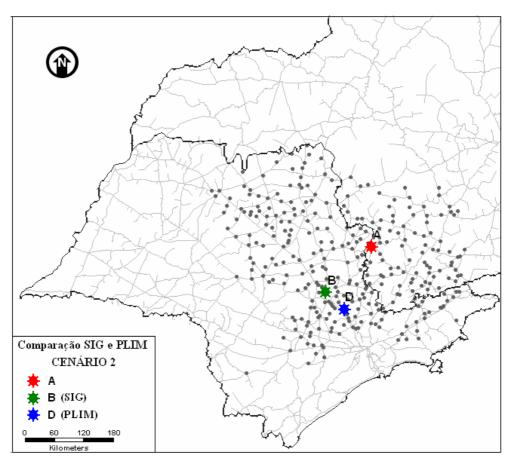


Figura 6.8 – Comparação entre as soluções do Cenário 2 para os modelos SIG e PLIM

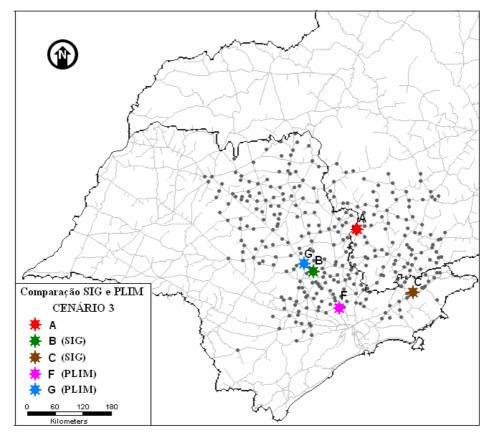


Figura 6.9 – Comparação entre as soluções do Cenário 3 para os modelos SIG e PLIM

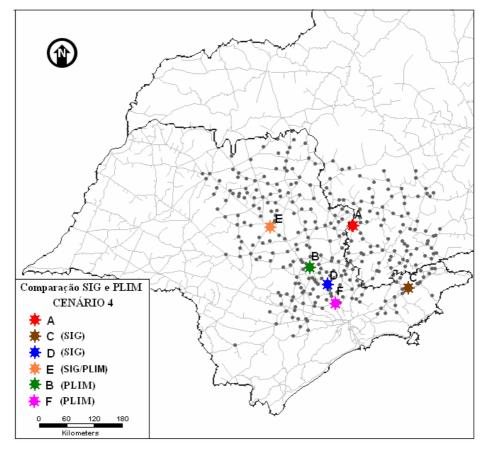


Figura 6.10 – Comparação entre as soluções do Cenário 4 para os modelos SIG e PLIM

6.3 Simulação III: localização e alocação entre creches e alunos

A Simulação III proposta irá abordar o sistema de ensino fundamental, aplicada a um total de 10 creches localizadas no interior da cidade de São Carlos, região central do estado de São Paulo. A área urbana de São Carlos corresponde a cerca de 45 Km², com um sistema viário bastante denso, organizado predominantemente de forma ortogonal. Relacionado à legislação municipal, o público-alvo matriculado nas creches consideradas compreende crianças na faixa etária de 0 a 3 anos de idade.

Segundo Lima (2003), é sem dúvida relevante no Brasil a falta de rigor na abordagem da questão da localização de equipamentos públicos urbanos, como escolas ou postos de saúde, e da utilização de forma racional desses equipamentos. Além da questão da localização, a alocação da demanda caracteriza-se como primordial, já que uma correta utilização das instalações existentes interfere diretamente na construção de novas unidades.

6.3.1 Obtenção dos dados necessários ao modelo

Os dados necessários para caracterizar a demanda e a oferta dos serviços considerados podem vir de diferentes origens, em diversificados níveis de agregação. Nesta simulação, como se trata de um problema em âmbito municipal, e não estadual, como visto nas simulações anteriores, os dados devem estar em níveis mais desagregados, ou seja, em um maior nível de detalhamento. Sendo assim, serão consideradas para estudo as localizações pontuais da demanda, identificadas pelo endereço postal dos alunos matriculados nas creches.

A primeira etapa para a construção do modelo de localização-alocação de facilidades é a aquisição dos dados geográficos para formar o banco de dados e camadas do SIG. Conforme já mencionado, a existência de dados e a disponibilidade dos mesmos são, na maioria das vezes, fatores cruciais para o desenvolvimento de projetos desta natureza. Para esta etapa da simulação, foram utilizados os dados obtidos no ano de 2000 pela Secretaria Municipal de Educação, e fornecidos ao projeto apresentado por Lima (2003), àquela época, que ainda estabeleceu o georeferenciamento dos usuários do sistema de educação. Estes dados correspondem basicamente ao endereço e à escola que freqüentava cada um dos alunos da

rede municipal de ensino público matriculados em creches, que somaram um total de 1.014 alunos, cada qual com uma demanda unitária, além dos endereços das 10 creches existentes.

Cabe ressaltar que a informação fundamental relativa à localização da unidade de atendimento (creche) utilizada pelo usuário (aluno) é uma informação que só está disponível quando se dispõe de dados georeferenciados. Outro dado essencial para o georeferenciamento é o arquivo contendo o eixo das ruas da cidade de São Carlos, obtida junto à Escola de Engenharia de São Carlos à pesquisa de Lima (2003), caracterizando aqui a rede viária da cidade. Percebe-se que um dos maiores benefícios que o uso de SIG pode gerar é o compartilhamento de dados espaciais previamente coletados e armazenados para um propósito inicial, que podem ser disponibilizados para uma gama de outras aplicações que envolvam as mesmas feições.

6.3.2 Problema de localização-alocação no modelo SIG

Depois de coletados e formatados, os dados referentes aos alunos matriculados no sistema municipal de educação foram lançados na base de dados do SIG. Sendo assim, todos alunos e creches tiveram seus endereços localizados num mapa, com a associação das camadas à suas respectivas bases de dados. A partir de então, o *software* SIG se encontra apto a realizar as simulações propostas para esta pesquisa.

A primeira etapa para a análise do sistema de educação proposto é a avaliação da localização e alocação real entre alunos e creches. Para isto, a opção de construção de mapas temáticos do SIG permite a visualização das alocações reais entre alunos e creches, onde os alunos pertencentes a uma mesma creche aparecem indicados por um símbolo que difere em níveis de cores para outros alunos, alocados a outras unidades escolares. Essa forma de comunicação da informação, em geral, produz grande impacto junto aos tomadores de decisão, uma vez que a má distribuição espacial é facilmente identificada numa simples análise visual, como pode ser percebida no mapa da Figura 6.10.

Nesta figura, as creches aparecem identificadas por um único símbolo, utilizando-se as letras de A a J para diferenciá-las, associadas às localizações dos alunos realmente matriculados em cada uma das creches. Na legenda do mapa, a cada creche está associado o número de alunos efetivamente matriculados, que pode ser visto nos valores entre parênteses, e que correspondem às diferentes cores do mapa.

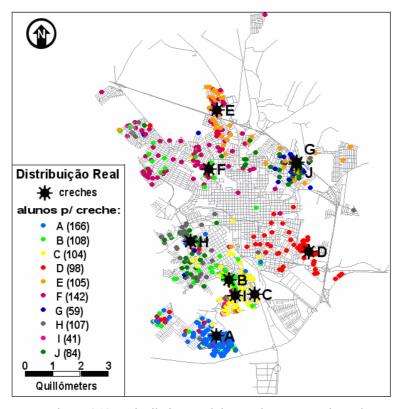


Figura 6.10 – Distribuição real das creches e respectivos alunos

A situação desejável para este cenário é que haja a maior concentração possível de alunos residindo próximo à unidade escolar que freqüentam, de forma a minimizar o custo de transporte. No entanto, pode-se notar pelo mapa a dispersão dos alunos (em relação aos pontos de mesma cor), responsáveis pelos maiores custos de deslocamento. Citando um exemplo, a creche representada pela letra B, localizada mais ao Sul da cidade, possui alunos matriculados que residem ao Norte, sendo este um ponto negativo, uma vez que o usuário precisa viajar grandes distâncias para chegar à creche. A partir das informações obtidas na análise do cenário real, distintos cenários serão propostos para esta simulação, a fim de se proceder à análise de alternativas de localização e alocação entre alunos e creches. A descrição do cenário real e dos cenários alternativos simulados está disposta no Quadro 6.6.

Cenário Real	Representa as localizações e alocações reais entre alunos e creches, no momento de coleta e análise dos dados.
Cenário 1	Partindo do Cenário Real, propõe-se simplesmente a realocação dos alunos às creches, sem considerar a abertura de novas unidades ou fechamento de creches existentes.
Cenário 2	Perante as 10 creches existentes, optou-se pela abertura de 1 nova unidade.
Cenário 3	Perante as 10 creches existentes, optou-se pela abertura de 2 novas unidades.
Cenário 4	Propõe o fechamento de uma das 10 creches existentes e a abertura de uma nova unidade.

Quadro 6.6 - Definição dos cenários da Simulação III

A partir do conhecimento da distribuição real entre alunos e creches, o Cenário 1 propõe refazer o cálculo dos custos de deslocamentos para todos os 1.014 alunos, medido entre a residência do aluno e a creche mais próxima, por meio do menor caminho indicado pelo sistema viário. Os Cenários 2, 3 e 4 foram sendo propostos com a abertura ou o fechamento de unidades. O modelo de localização-alocação será utilizado para buscar uma melhor distribuição espacial, visando gerar alternativas que possam minimizar o custo total de transporte, de forma que os usuários realizem os menores deslocamentos possíveis de sua residência até a creche em que estudam.

As variáveis consideradas como fundamentais para a análise em questão são as que refletem os custos de deslocamentos, sejam elas relativas aos deslocamentos totais, individuais ou médios. Quando se têm os dados de demanda pontuais, de forma desagregada, é possível identificar o custo de deslocamento individual de cada um dos alunos, seus valores mínimos ou máximos, e calcular os custos de deslocamento médio e total entre a gama de usuários. Estes dados são de suma importância, pois é a partir deles que se farão inferências entre os cenários, tanto de possíveis localizações para novas creches quanto de alocação de alunos, e proceder-se-á às comparações entre os modelos SIG e PLIM.

Para o Cenário 1, os limites de capacidade impostos a cada uma das creches, para a rotina Problema do Transporte, foi estabelecido como sendo o número de alunos realmente matriculados na creche específica, à época de coleta e análise dos dados, desconsiderando-se se há uma superlotação ou ociosidade em suas instalações físicas. Para uma análise mais criteriosa do problema em questão, que não constitui aqui o objetivo da simulação, seria necessário que se averiguasse se cada uma das creches possui capacidade para atender um maior número de alunos, o que geraria um aumento no valor de sua capacidade, ou se a mesma está com excesso de alunos matriculados, operando acima de seus limites máximos, o que provavelmente implicaria em uma redução da capacidade estabelecida para aquela determinada creche. Ressalta-se que estas condições não foram analisadas.

Para a definição dos limites de capacidade nos Cenários 2, 3 e 4 utilizou-se, inicialmente, da mesma hipótese. Para o Cenário 2, no qual foi proposta a abertura de uma nova creche, a capacidade desta unidade foi estabelecida como sendo 10% da demanda total de alunos (equivalente a 101, uma vez que se têm 1.014 alunos matriculados), reduzindo-se em 10% a capacidade de cada creche existente. No Cenário 3, cada uma das 2 novas unidades abertas também possui a capacidade máxima individual equivalente a 10% da demanda total, redistribuindo equitativamente as demais capacidades das creches em operação. No Cenário 4,

a capacidade de oferta da creche fechada foi realocada para a nova unidade aberta pelo modelo. Estas suposições de limites de capacidade para as creches, embora não sejam realistas, são de suma importância para se estabelecer critérios de comparação entre os modelos SIG e PLIM, que devem possuir as mesmas condições iniciais e parâmetros de entrada, inclusive os locais candidatos à localização de novas creches.

A fim de se proceder às simulações, é necessário que o problema proposto seja tratável computacionalmente. Para a heurística do SIG, a complexidade do problema não constitui um obstáculo, porém é uma grande limitação para a técnica exata do modelo PLIM. Sendo assim, o número de candidatos à localização para o modelo SIG pode ser relativamente elevado, como, por exemplo, a consideração de que todas as interseções da camada de linhas contendo o eixo das ruas constituam o conjunto de candidatos (que no caso somaria um total de 6.583 pontos). Porém, para proceder ao modelo PLIM, este conjunto de candidatos deve ser restrito.

Para esta simulação, o problema contém 1.014 alunos, 10 creches instaladas, e então se deve estabelecer um número de candidatos à localização de novas creches que torne possível a resolução em tempo computacional razoável pelo modelo PLIM. Frente a esta imposição, o método adotado para identificar o conjunto de candidatos foi a partir da localização de pontos equidistantes (0,7 Km), que cobrissem toda a região sob estudo, no caso, somando um total de 120 pontos, como pode ser visualizado na Figura 6.11, além das localizações pontuais das 10 creches existentes, totalizando 130 candidatos. Este conjunto de candidatos foi então considerado para ambos os modelos, SIG e PLIM, a fim de se proceder à comparação e análises posteriores entre os modelos.

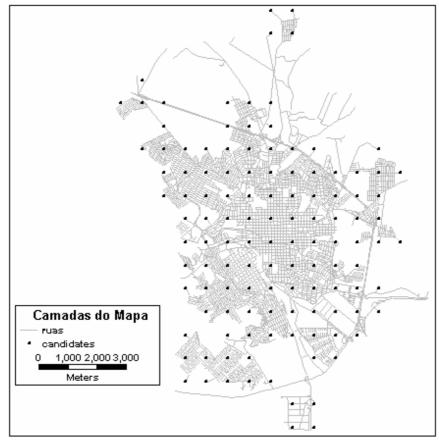


Figura 6.11 – Conjunto de candidatos à localização para Simulação III

Estabelecidos os cenários e suas características de simulação, estes serão submetidos às duas rotinas do SIG: Localização de Facilidades e Problema do Transporte. A Tabela 6.7 apresenta os resultados para os Cenários 1 e 2, e a Tabela 6.8 mostra os resultados obtidos para os Cenários 3 e 4 de simulação, além das alocações reais dos alunos às suas respectivas creches, indicando os custos de deslocamentos médio, máximo e total.

Para apresentação dos resultados em forma de tabelas, foi estabelecido que cada uma das 10 creches existentes seriam representadas por letras variando de A a J (como também apresentado nos mapas temáticos gerados pelo SIG), e as creches escolhidas entre as candidatas às possíveis localizações serão indicadas pelas letras K e L. Podem-se então calcular as reduções de deslocamentos dos cenários alternativos em relação aos valores da distribuição do Cenário Real. A equação utilizada foi:

$$var (\%) = \frac{cen \acute{a}rio \ simulado - cen \acute{a}rio \ real}{cen \acute{a}rio \ real} * 100 \tag{6.2}$$

					Мо	delo SIG				
		Cenário		Cená	rio 1			Cena	ário 2	_
Real			LF	var	PT	var	LF	var	PT	var
	Α	166	196	18%	166	0%	196	18%	149	-10%
	В	108	115	6%	108	0%	115	6%	97	-10%
	С	104	22	-79%	104	0%	22	-79%	94	-10%
	D	98	78	-20%	98	0%	78	-20%	88	-10%
ပ္သ	E	105	105	0%	105	0%	105	0%	95	-10%
CRECHES	F	142	147	4%	142	0%	69	-51%	128	-10%
3EC	G	59	37	-37%	59	0%	37	-37%	53	-10%
2	Н	107	88	-18%	107	0%	88	-18%	96	-10%
	ı	41	125	205%	41	0%	125	205%	37	-10%
	J	84	101	20%	84	0%	101	20%	76	-10%
	K						78		101	
	L									
Custo I (Kr		2,04	0,99	-52%	1,10	-46%	6% 0,86 -58% 1,23 -4		-40%	
Custo Máximo (Km)		10,52	5,28	-50%	5,34	-49%	5,20	-51%	5,20	-51%
Custo Total (Km)		2070	1001	-52%	1120	-46%	877	-58%	1244	-40%

Tabela 6.7 – Resultados para os Cenários 1 e 2 do modelo SIG

						Modelo	SIG			
	•	Cenário		Cena	irio 3			Cená	rio 4	
		Real	LF	var	PT	var	LF	var	PT	var
	Α	166	169	2%	133	-20%	196	18%	166	0%
	В	108	115	6%	86	-20%	119	10%	108	0%
	С	104	22	-79%	83	-20%	fechada	-	fechada	-
	D	98	78	-20%	78	-20%	78	-20%	98	0%
ູດ	E	105	105	0%	84	-20%	105	0%	105	0%
СВЕСНЕЅ	F	142	69	-51%	114	-20%	69	-51%	142	0%
Ĕ	G	59	37	-37%	47	-20%	37	-37%	59	0%
5	Н	107	88	-18%	86	-20%	88	-18%	107	0%
	ı	41	125	205%	34	-17%	143	249%	41	0%
	J	84	101	20%	67	-20%	101	20%	84	0%
	K		78		101		78		104	
	L		27		101					
Custo	Médio	2,04	0,81	-60%	1,09	-47%	0,87	-57%	1,43	-30%
(Kr	n)									
Custo N	láximo	10,52	5,20	-51%	5,20	-51%	5,20	-51%	5,57	-47%
(Kr	n)									
Custo	Total	2070	822	-60%	1102	-47%	885	-57%	1452	-30%
(Kr	n)									

Tabela 6.8 – Resultados para os Cenários 3 e 4 do modelo SIG

Além das tabelas, contendo os valores numéricos obtidos a partir das simulações efetuadas para os distintos cenários, o SIG, em sua rotina Localização de Facilidades, gerou estas mesmas informações em forma de mapas temáticos, os quais indicam as localizações

das creches e respectivas alocações entre alunos (Figuras 6.12, 6.13, 6.14 e 6.15, para os Cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente). A partir das informações agrupadas nas tabelas de resultados e nos mapas temáticos para os distintos cenários simulados, a primeira comparação a se fazer é com relação ao Cenário Real e Cenários 1, 2, 3, e 4 do SIG.

Com as informações contidas nas variáveis de custo médio, máximo e total, presentes nas Tabelas 6.7 e 6.8, percebe-se que a totalidade dos cenários simulados obteve resultados melhores que os valores do Cenário Real, ou seja, geraram soluções de menores custos de transportes, em ambas as rotinas, LF e PT. Esta constatação pode ser averiguada pelos valores negativos da variável *var* (%), que indica justamente esta redução de custos. Comparando-se o mapa relativo ao Cenário Real (Figura 6.10) com os mapas gerados na simulação dos Cenários 1, 2, 3 e 4 (Figuras 6.12, 6.13, 6.14 e 6.15), percebe-se também uma melhor distribuição dos alunos às creches, que estão menos dispersos, concentrando-se mais nas proximidades da referida creche (indicados pelos pontos de mesma cor).

Especial ênfase deve ser dada ao Cenário 1, no qual foi proposto apenas a realocação entre os alunos às creches, não havendo, portanto, custos de instalações associados à abertura ou ao fechamento de creches. Só com uma realocação entre os alunos, mantendo-se as respectivas capacidades das creches, é possível se ter uma redução da ordem de 46% nos custos médio e total de serviço em relação ao Cenário Real, sendo que o custo máximo (distância máxima percorrida pelos alunos) reduziu-se em 50%, passando de 10,52 Km no Cenário Real a apenas 5,34 Km na rotina PT do Cenário 1.

Analisando os Cenários 2, 3 e 4, percebe-se que, com a abertura de novas creches, é possível minimizar os custos de transporte, se comparado ao Cenário Real. No Cenário 2, houve uma redução de 40% do custo total de transporte, alcançado no modelo PT perante a abertura de uma nova creche (K), sendo que no Cenário 3 houve uma redução de 47% deste custo, com a abertura de duas novas creches (K, L). No Cenário 4, foi proposto o fechamento da creche indicada pela letra C, pois na rotina Localização de Facilidades foi a unidade que representou o menor número de alunos alocados, e a abertura de uma nova creche (K), reduzindo o custo total de deslocamento em 30 % comparado à distribuição real dos alunos. Percebe-se que nos Cenários 2, 3 e 4, a(s) creche(s) indicada(s) para abertura na rotina LF se manteve constante na rotina PT.

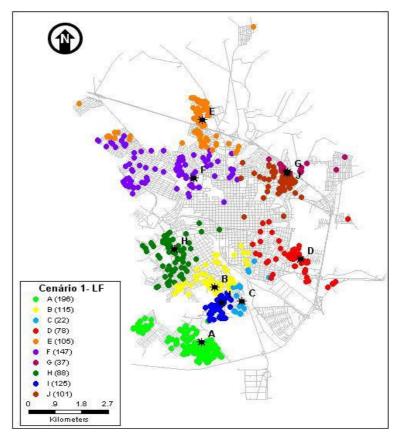


Figura 6.12 – Solução gerada pela rotina Localização de Facilidades para o Cenário 1

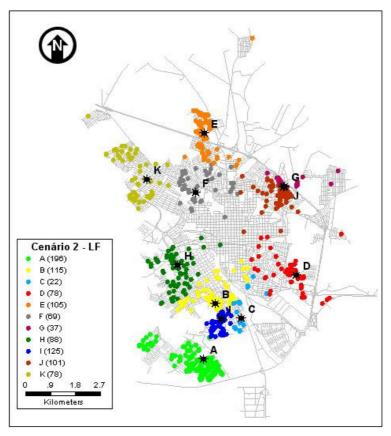


Figura 6.13 – Solução gerada pela rotina Localização de Facilidades para o Cenário 2

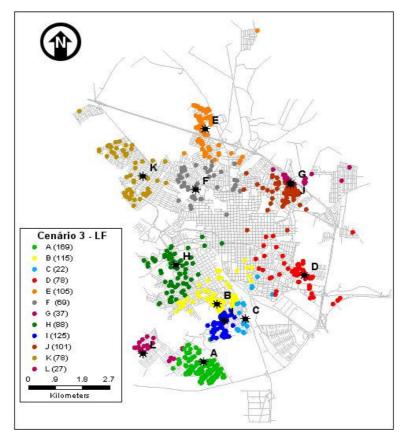


Figura 6.14 – Solução gerada pela rotina Localização de Facilidades para o Cenário 3

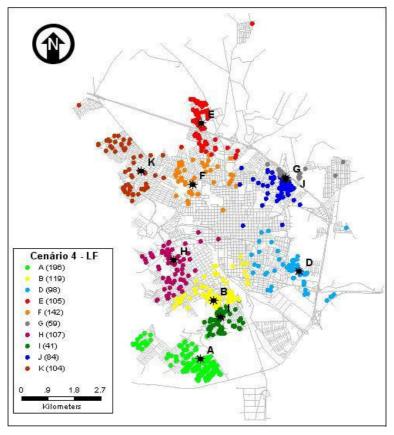


Figura 6.15 – Solução gerada pela rotina Localização de Facilidades para o Cenário 4

6.3.3 Problema de localização-alocação no modelo PLIM

Conforme o escopo da pesquisa, para se estabelecer uma comparação entre os modelos SIG e PLIM, os mesmos cenários utilizados no modelo SIG, presentes no Quadro 6.6, serão aqui também simulados, sob as mesmas características de locais candidatos à localização e considerações de limites máximos de capacidades. Os resultados obtidos pelo modelo PLIM, para os 4 cenários simulados, estão representados nas Tabelas 6.10 e 6.11.

Pela análise das tabelas, percebe-se que o modelo PLIM obteve melhores resultados para todos os cenários, se comparado à solução praticada no Cenário Real, em termos de menores valores de custos totais de transporte. O modelo PLIM alcançou resultados 46% melhor para o Cenário 1, com a realocação dos alunos às creches, 47% para o Cenário 2, com a abertura de uma nova creche (M), 50% melhor para o Cenário 3, com a abertura de 2 novas creches (K, N), e 49% melhor com o fechamento da creche C e abertura de nova creche (M), quando comparados com os custos totais praticados no Cenário Real.

Mais importante que estas constatações, percebe-se que, nos Cenários 2, 3 e 4, nos quais foram propostas a abertura e/ou fechamento de unidades, as rotinas SRC e CRC do modelo PLIM geraram distintas localizações para as creches, ou seja, quando a restrição de limite máximo de capacidade é imposta ao modelo, as soluções de alocação dos alunos se alteram, e conseqüentemente as localizações das creches.

Os tempos de processamento computacional consumidos pelo modelo PLIM, para os distintos cenários simulados, separados para suas rotinas SRC e CRC, foram coletados e se encontram armazenados na Tabela 6.9. Estes tempos variaram de 48 segundos (Cenário 1, CRC) a quase 2 horas de processamento (Cenário 3, CRC).

Tempos consumidos pelo modelo PLIM									
Cená	irio 1	Cená	rio 2	Cená	irio 3	Cenário 4			
SRC	CRC	SRC	CRC	SRC CRC		SRC	CRC		
00:01:39 00:00:48 00:01:39 00:42:46 00:02:56 01:52:14 00:01:46 00:07:									

Tabela 6.9 – Tempos consumidos pelo modelo PLIM nos diferentes cenários

					Mod	lelo PLIM				
		Cenário		Cená	rio 1			Cená	irio 2	
		Real	SRC	var	CRC	var	SRC	var	CRC	var
	Α	166	196	18%	166	0%	196	18%	149	-10%
	В	108	115	6%	108	0%	115	6%	97	-10%
	С	104	22	-79%	104	0%	22	-79%	94	-10%
	D	98	78	-20%	98	0%	78	-20%	88	-10%
	E	105	105	0%	105	0%	105	0%	95	-10%
S	F	142	147	4%	142	0%	69	-51%	128	-10%
罢	G	59	37	-37%	59	0%	37	-37%	53	-10%
CRECHES	Н	107	88	-18%	107	0%	88	-18%	96	-10%
2	ı	41	125	205%	41	0%	125	205%	37	-10%
	J	84	101	20%	84	0%	101	20%	76	-10%
	K						78			
	L									
	М								101	
	N									
Custo (Kr		2,04	0,99	-52%	1,10	-46%	0,86	-58%	1,08	-47%
	Custo Máximo (Km)		5,28	-50%	5,34	-49%	5,20	-51%	5,28	-50%
Custo (Kr		2070	1001	-52%	1120	-46%	877	-58%	1095	-47%

Tabela 6.10 – Resultados para os Cenários 1 e 2 do modelo PLIM

-					Мо	delo PLI	M			
	•	Cenário		Cena	ário 3			Cená	rio 4	
		Real	SRC	var	CRC	var	SRC	var	CRC	var
	Α	166	169	2%	133	-20%	196	18%	166	0%
	В	108	115	6%	86	-20%	119	10%	108	0%
	С	104	22	-79%	83	-20%	fechada	-	fechada	-
	D	98	78	-20%	78	-20%	78	-20%	98	0%
	E	105	105	0%	84	-20%	105	0%	105	0%
S	F	142	69	-51%	114	-20%	69	-51%	142	0%
累	G	59	37	-37%	47	-20%	37	-37%	59	0%
CRECHES	Н	107	88	-18%	86	-20%	88	-18%	107	0%
2	- 1	41	125	205%	34	-17%	143	249%	41	0%
	J	84	101	20%	67	-20%	101	20%	84	0%
	K		78		101		78			
	L		27							
	M								104	
	N				101					
Custo		2,04	0,81	-60%	1,01	-50%	0,87	-57%	1,05	-49%
(Kr	,	_,-,-	0,0 :	0070	.,		3,37	0. 70	.,	, .
Custo N		10,52	5,20	-51%	5,20	-51%	5,20	-51%	5,34	-49%
(Kr	,	-								
Custo (Kr		2070	822	-60%	1027	-50%	885	-57%	1063	-49%
(171)	11)						<u> </u>		-	

Tabela 6.11 – Resultados para os Cenários 3 e 4 do modelo PLIM

6.3.4 Comparação dos resultados gerados entre os dois modelos

Uma análise quantitativa pode ser estabelecida comparando-se as Tabelas 6.7 e 6.8 do modelo SIG, com as Tabelas 6.10 e 6.11 do modelo PLIM, então resumidas na Tabela 6.12. A equação usada para o cálculo da variação entre os dois modelos já foi apresentada nas simulações anteriores, correspondente à Equação 6.1.

	(Km)	S	SIG	PLIM		Variação	
	(KIII)	LF	PT	SRC	CRC	LF vs. SRC	PT vs. CRC
_	Custo Médio	0,99	1,10	0,99	1,10	0%	0%
Cenário 1	Custo Máximo	5,28	5,34	5,28	5,34	0%	0%
ŏ	Custo Total	1001	1120	1001	1120	0%	0%
2	Custo Médio	0,86	1,23	0,86	1,08	0%	14%
Cenário 2	Custo Máximo	5,20	5,20	5,20	5,28	0%	-2%
ŏ	Custo Total	877	1244	877	1095	0%	14%
ဗ	Custo Médio	0,81	1,09	0,81	1,01	0%	7%
Cenário 3	Custo Máximo	5,20	5,20	5,20	5,20	0%	0%
ŏ	Custo Total	822	1102	822	1027	0%	7%
4	Custo Médio	0,87	1,43	0,87	1,05	0%	37%
Cenário 4	Custo Máximo	5,20	5,57	5,20	5,34	0%	4%
ŏ	Custo Total	885	1452	885	1063	0%	37%

Tabela 6.12 – Variação entre as soluções obtidas pelos modelos SIG e PLIM

Percebe-se, pela análise da tabela, que não houve variação entre as soluções geradas pela rotina LF do modelo SIG, e rotina SRC do modelo PLIM, nos quatro cenários simulados. Porém, analisando as soluções geradas pela rotina PT do modelo SIG, e rotina CRC do modelo PLIM, percebe-se que o segundo modelo obteve soluções de menores custos de transporte para os Cenários 2, 3 e 4. O modelo PLIM obteve uma eficiência 14% maior em reduzir os custos totais que o modelo SIG para o Cenário 2, onde o custo total passou de 1.244 Km para 1.095 Km. No Cenário 3, a redução relativa foi de 7%, e no Cenário 4 esta redução foi de 37% para o custo total, além de uma redução relativa de 4% no custo máximo

de deslocamento de determinado aluno, que passou de 5,57Km para 5,34Km, reduzindo-se 230m. Percebe-se que as reduções nos valores de custo total refletem diretamente nas reduções dos custos médios, e vice-versa, ou seja, ao minimizar um valor de custo está simultaneamente reduzindo o outro, de forma proporcional.

Além dos resultados numéricos, há também de se comparar os locais escolhidos para abertura das creches para os dois modelos, SIG e PLIM. Para averiguar as indicações das creches, deve-se recorrer às tabelas de resultados dos dois modelos (Tabelas 6.7 e 6.8 para modelo SIG, e Tabelas 6.10 e 6.11 para modelo PLIM). Conforme já constatado, o modelo SIG gera as mesmas localizações para as creches em suas duas rotinas, LF e PT. Estas indicações de abertura podem ser visualizadas nos mapas que correspondem a cada um dos cenários simulados (Figuras 6.12, 6.13, 6.14 e 6.15). O modelo PLIM localizou as mesmas creches do modelo SIG, em sua rotina SRC (por isto não houve variações na comparação entre estas duas rotinas, previamente comentada). Em compensação, o modelo PLIM, em sua rotina CRC, gerou distintas localizações para as creches, em todos aqueles cenários onde foi proposta a abertura de novas unidades (Cenários 2, 3 e 4).

No Cenário 2, a solução do modelo SIG foi a localização da creche K, enquanto o modelo PLIM localizou a creche M. Para o Cenário 3, o modelo SIG localizou as creches K e L, e o modelo PLIM localizou as creches K e N. No Cenário 4 os dois modelos tiveram como dado de entrada o fechamento da creche C, e geraram como solução a abertura da creche K para o modelo SIG, e a abertura da creche M para o modelo PLIM. As diferentes localizações geradas pelos modelos SIG e PLIM, para o Cenário 4 de simulação, podem ser visualizadas no mapa da Figura 6.16. Pela análise da figura, nota-se que as localizações das creches estão em áreas distintas: o modelo SIG localizou a creche K bem ao Norte, e o modelo PLIM localizou a creche M ao Sul da cidade de São Carlos, o que obviamente contribuiu para a redução dos custos de deslocamento em favor do modelo PLIM em 37%, comparando-se com a solução obtida pelo modelo SIG.

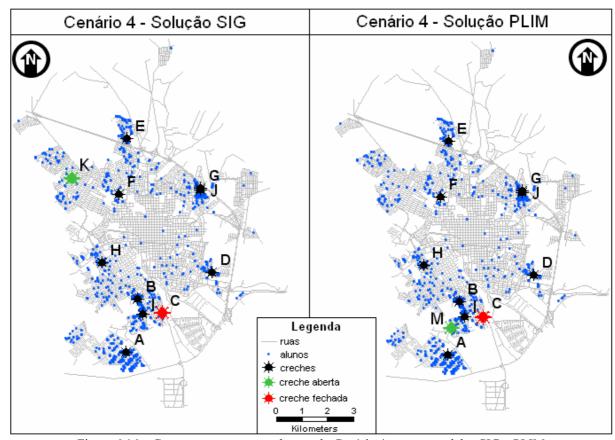


Figura 6.16 - Comparação entre as soluções do Cenário 4 para os modelos SIG e PLIM

6.4 Análise geral dos resultados

Analisando as comparações efetuadas entre as soluções geradas pelos modelos SIG e PLIM percebeu-se que, na totalidade dos cenários simulados, os dois modelos obtiveram os mesmos resultados para as rotinas que não envolviam a restrição de limite máximo de capacidade das instalações. As mesmas soluções de localização e alocação obtidas pela rotina Localização de Facilidades (LF) do modelo SIG foram também geradas pela rotina Sem Restrição de Capacidade (SRC) do modelo PLIM, gerando custos de transporte iguais.

Sabe-se que à rotina Localização de Facilidades do SIG está associada uma modelagem heurística, e o que modelo PLIM é um modelo exato, garantindo a solução "ótima" do problema tratado. Visto que a heurística subordinada à rotina LF do SIG produziu soluções com as mesmas localizações, alocações e valores de custo total que a solução exata da rotina SRC do modelo PLIM, uma conclusão importante diz respeito à mensuração do desempenho da heurística da rotina LF, classificando-a como de boa qualidade, uma vez que esta convergiu para a solução matemática ótima na totalidade dos cenários simulados.

Além de ter se mostrado uma heurística robusta, a rotina Localização de Facilidades do modelo SIG, ao proceder à localização e respectiva alocação, otimiza a capacidade das instalações de acordo com a localização das demandas. Citando um exemplo, na Simulação III, para o Cenário 1, no qual buscava-se realocar os alunos às creches existentes, desconsiderando a abertura ou fechamento de unidades, a rotina LF gerou como resultado a otimização das capacidades das creches, indicada na Tabela 6.7. Sendo assim, as creches deveriam ter suas capacidades projetadas (ou re-projetadas) para atender o número de alunos alocados, indicado pela rotina LF. Por exemplo, a creche A teria capacidade para atender 196 alunos, e a creche J, capacidade para ter 101 alunos matriculados. Se as capacidades de todas as creches fossem redimensionadas para os valores indicados na rotina LF, o modelo SIG geraria uma redução nos custos totais de deslocamento na ordem de 52%. Porém, obviamente, incorreria em outros custos, como de expansão ou retração das instalações físicas existentes.

Analisando as soluções finais do problema de localização-alocação de instalações, ao se considerar os limites máximos de capacidade, geradas pela rotina Problema do Transporte (PT) do modelo SIG e rotina Com Restrição de Capacidade (CRC) do modelo PLIM, pode-se observar que, durante as três simulações efetuadas, para a maioria dos cenários simulados (67%), o modelo PLIM obteve melhores resultados que o modelo SIG. Estes melhores resultados são conseqüência de melhores soluções de localização e respectiva alocação entre os clientes e as instalações, traduzidos em termos de menores custos de transporte.

A razão da rotina PT do modelo SIG não ter indicado as mesmas localizações de instalações, geradas na rotina CRC do modelo PLIM, pode ser explicada pelo fato do modelo SIG executar a localização e respectiva alocação, conforme os limites de capacidade máxima, de forma indireta. Primeiramente, a rotina LF localiza um número fixo de instalações, sem levar em consideração os limites de capacidade associados, realizando as alocações entre centros de demanda e oferta, a partir da abertura de novas unidades (ou o fechamento de unidades já existentes). Na seqüência, esta solução se torna dado de entrada para a rotina PT, que irá realocar as demandas à oferta, levando em consideração as capacidades máximas instaladas, e viabilizando a fragmentação das demandas. Porém, esta rotina não permite mais a abertura ou fechamento de instalações, advindas da rotina anterior LF, ou seja, quando o SIG executa a rotina PT, já está pré-condicionado à configuração inicial de número e localização das instalações.

Esta forma indireta de resolução do problema acabou por gerar uma desvantagem para o modelo SIG, durante a resolução dos problemas de localização-alocação de instalações

propostos neste trabalho, confirmando a hipótese inicial. O mesmo não ocorre no modelo PLIM, que possui a vantagem de quantificar, localizar e alocar a demanda à oferta, levando em consideração os limites máximos de capacidade, e possibilitando ainda que um centro de oferta possa abastecer vários clientes, e que um cliente possa ter sua demanda suprida por mais de um ponto de oferta, sendo todas estas decisões tomadas de forma simultânea. Esta constatação explica o fato do modelo PLIM localizar instalações em diferentes pontos, quando comparado ao modelo SIG ou mesmo dentro de suas próprias rotinas internas, SRC e CRC, para um mesmo cenário simulado, o que acaba por garantir uma solução final com distintas localizações e, conseqüentemente, menores custos de transportes.

Na medida em que se vai relaxando a restrição de limite superior de capacidade das instalações, ou seja, ao invés de fixar um valor limite, estabelecer faixas de limite de capacidade, permitindo um aumento nos valores de suas capacidades, as soluções geradas pelo modelo SIG tendem a se aproximar das soluções PLIM em termos de alocações fornecedor-cliente, até chegar ao ponto em que o problema se torna não-capacitado, momento em que a solução SIG se iguala à solução PLIM, gerando as mesmas localizações e alocações, e conseqüentemente mesmos valores de custos de transportes. Isto ocorre devido às maiores chances que o modelo SIG terá de realocar a demanda às instalações de oferta localizadas anteriormente pela rotina LF, visto que estas possuirão um limite superior de capacidade maior, permitindo a atenção a um maior valor de demanda. A Tabela 6.13 ilustra este fato, apresentando a Simulação II para localização entre CD's e respectivos clientes.

rio		SIG			PLIM			Variação
Cenário	Limite de	Locais para	Alocação	Custo	Locais para	Alocação	Custo	SIG vs.
\mathcal{C}	Capacidade	Instalações	Demanda	Total	Instalações	Demanda	Total	PLIM
1	4.634.323	Poços de Caldas	3.861.936	820	Poços de Caldas	3.861.936	820	0,0%
2	2 217 162	Poços de Caldas	1.544.774	478	Poços de Caldas	1.544.774	470	0.00/
2	2 2.317.162	Limeira	2.317.162		Limeira	2.317.162	478	0,0%
		Poços de Caldas	1.544.774		Poços de Caldas	941.708		
3	1.544.774	Limeira	1.544.774	460	Jundiaí	1.544.774	396	16,2%
		Pindamonhangaba	772.388		São Carlos	1.375.454		
	4 1.158.581	Poços de Caldas	1.017.463		Poços de Caldas	869.718		
4		Pindamonhangaba	527.311	266	Jundiaí	1.158.581	336	0.00/
4		Campinas	1.158.581	366	Limeira	1.153.346		8,9%
		Araraquara	1.158.581		Araraquara	680.291		

Tabela 6.13 – Novas soluções com o aumento do limite de capacidade dos CD's

Para a Simulação II, ao aumentar a faixa de limite de capacidades em 20% do seu valor inicial e proceder às rotinas dos modelos SIG e PLIM que envolvem a restrição de capacidade

para cada um dos cenários simulados, obtém-se novas soluções de alocação entre CD's e clientes, como pode ser visto na Tabela 6.13, ao comparar com a solução presente na Tabela 6.6. Estas diferentes soluções de alocação conseqüentemente geram distintos valores de Custo Total de serviço, lembrando-se que esta variável, para esta simulação, é da ordem de milhões de Km. Embora ainda haja diferença entre as soluções de localização e alocação geradas pelos modelos SIG e PLIM com o aumento do limite de capacidades, a variação entre os dois modelos reduziu-se. Com os valores de limite impostos anteriormente para o Cenário 2 de simulação, por exemplo, a variação entre os dois modelos era de 1,4% (vide Tabela 6.6), já com um limite de capacidade 20% maior, não houve diferença entre os dois modelos, ficando a variação em 0%, ou seja, os modelos SIG e PLIM produziram as mesmas soluções de localização e alocação. A mesma constatação pode ser averiguada para os Cenários 3 e 4 desta simulação, em que a variação entre os modelos também se reduziu. Estes testes de limites de capacidades foram também realizados para as Simulações I e III, podendo-se dizer que as conclusões convergem.

Outro ponto que merece destaque nesta análise diz respeito ao momento da formulação de problemas reais, em que o número de possíveis candidatos à localização de instalações tende a ser reduzido. Com isto, há uma tendência também em se reduzir divergências de localizações entre as soluções obtidas pelos dois modelos, SIG e PLIM. Por exemplo, analisando as localizações geradas no Cenário 3 da Simulação II, representadas no mapa da Figura 6.9, o modelo SIG localizou os CD's indicados pelas letras B e C, enquanto o modelo PLIM localizou os CD's F e G. Embora os CD's F e C estejam relativamente distantes, os CD's B e G se encontram fisicamente próximos. Para esta mesma simulação, caso o conjunto de locais candidatos a possíveis localizações fosse restrito, a possibilidade dos modelos SIG e PLIM ter localizado os CD's B e G em um mesmo local seria maior.

Percebe-se então que a solução de localização de instalações e alocação da demanda está fortemente relacionada ao conjunto de candidatos à localização. Se este conjunto se altera, a solução do problema, e conseqüentemente os custos de transporte associados, tendem a se alterar. Sendo assim, quanto maior o número de locais candidatos, melhor será a qualidade esperada da solução. Porém, um acréscimo do número de variáveis do problema é proporcional à complexidade do mesmo, refletindo no aumento do tempo de processamento computacional consumido para geração da solução. Esta análise revela mais uma potencialidade do SIG que, por ser programado com base em heurísticas, possui a capacidade de analisar ampla gama de variáveis, em tempo de processamento relativamente curto.

Foi constatado que o SIG gerou soluções para as simulações em questão de poucos segundos (inferior a 5 segundos para qualquer cenário proposto). Já no modelo PLIM, o tempo de processamento foi bastante maior, chegando em alguns cenários, como no Cenário 4 da Simulação II, um máximo de 2 horas, 44 minutos e 10 segundos para a rotina SRC. Para compensar o tempo de processamento computacional, que se eleva segundo uma função exponencial, e número de variáveis consideradas para um problema exato tende a ser reduzido, como procedido nas Simulações II e III, considerados problemas de médio e grande porte, para o conjunto de locais candidatos à localização.

Como consequência desta análise, percebe-se também que, à medida que o número de instalações a serem localizadas aumenta, o tempo de processamento do modelo PLIM também aumenta, inviabilizando a localização de múltiplas instalações em tempo computacional razoável. Esta constatação foi observada nas simulações consideradas de médio e grande porte (Simulações II e III). Na Simulação I, por ser de pequeno porte, os tempos de processamento, para qualquer dos cenários simulados, foi da ordem de 1 segundo.

A característica de capacidade de solução de problemas de localização em curtíssimo intervalo de tempo é mais uma vantagem do SIG, pois permite gerar vários cenários alternativos. Por exemplo, para a Simulação I, a abertura de 3 novas unidades fabris, com a unidade de Campinas já em operação (Cenário 4 de simulação), talvez não seja uma solução economicamente viável para a empresa. Assim, o planejador irá concluir que a restrição imposta ao modelo de que a distância média entre centros de demanda/oferta fosse inferior a 100Km é uma restrição muito forte, podendo escolher aquela opção que melhor se enquadre às suas restrições orçamentárias, através da geração de cenários alternativos.

Essa constatação também pode ser averiguada na Simulação II. Percebe-se, pela análise da Tabela 6.4, que a variável Custo Médio de transporte ficou inferior a 100 Km apenas no Cenário 4 de simulação (Custo Médio = 83 Km). Porém, no Cenário 3 este limite de custo já estava praticamente alcançado (Custo Médio = 101 Km), com a abertura de apenas duas novas unidades de CD, ao invés de três. Este é um tipo de análise extremamente útil quando se almeja instalar novas facilidades com o objetivo de reduzir os custos de transporte e instalações, e é rapidamente obtida pelo SIG. Uma vez que se tem posse da camada de pontos contendo as coordenadas geográficas dos centros de oferta e dos clientes, bem como suas demandas, integradas a uma base de dados do SIG, este sistema torna relativamente simples a obtenção de informações úteis à tomada de decisão relativa à localização, enquadrando o SIG como um SADE.

Conclusões e Recomendações

O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade das soluções para o problema de localização-alocação de instalações geradas pelo SIG TransCAD, obtidas após a utilização combinada de suas duas rotinas (Localização de Facilidades e Problema do Transporte), quando comparadas com as supostas soluções ótimas, obtidas a partir de um modelo matemático desenvolvido externamente ao SIG. A rotina Localização de Facilidades inclui a possibilidade de abertura ou fechamento de instalações, porém não estabelece as restrições de capacidade, e a rotina Problema do Transporte realoca as demandas conforme as restrições de capacidade, permitindo sua fragmentação, porém não admite mais a abertura ou fechamento destas unidades, estando condicionado à solução anterior de número e locais de instalações.

Para atingir o objetivo, foi desenvolvido um modelo matemático exato baseado em Programação Linear Inteira Mista (modelo PLIM), externo ao SIG, interagindo com o mesmo nos momentos de entrada e saída de dados. Seguindo a metodologia de pesquisa, classificada como modelagem e simulação, o trabalho realizou simulações para três aplicações distintas, com diferentes níveis de complexidade: uma primeira, que propôs uma simulação entre fábricas e clientes, compreendendo o estado de São Paulo e 18 de seus principais municípios; uma simulação no setor privado, a fim de se localizar centros de distribuição para intermediação entre um atacadista específico e seus clientes varejistas, presentes no sul de Minas Gerais e estado de São Paulo; e a uma simulação no setor público, tendo por objetivo identificar as melhores localizações para creches e respectivas alocações dos alunos a estas unidades, realizada na cidade de São Carlos, São Paulo.

Com base na teoria apresentada sobre localização de instalações e Sistemas de Informações Geográficas, e nos resultados obtidos com a aplicação da metodologia às três situações práticas, pode-se chegar a algumas conclusões a respeito da qualidade de solução do modelo SIG, destacando suas desvantagens e potencialidades ao abordar o problema de localização-alocação de instalações.

Com relação à qualidade e precisão das soluções, ao se comparar os resultados dos modelos SIG e PLIM, notou-se que, em um primeiro momento, os dois se comportaram de

forma semelhante, sendo as soluções de localização e alocação produzidas pelo modelo SIG, em sua rotina Localização de Facilidades (LF), iguais às soluções geradas pelo modelo PLIM, em sua rotina "Sem restrição de capacidade" (SRC). Esta constatação foi averiguada na totalidade dos cenários simulados, para as três aplicações práticas desenvolvidas, chegando-se à conclusão de que a heurística embutida no SIG para a rotina LF foi eficiente, uma vez que convergiu para a solução matemática ótima em todos os cenários.

No entanto, ao se analisar o modelo SIG, em sua rotina Problema do Transporte (PT), e o modelo PLIM, em sua rotina "Com restrição de capacidade" (CRC), percebeu-se que as soluções de alguns cenários simulados foram diferentes entre os dois modelos, ou seja, geraram localizações e respectivas alocações distintas, sendo as soluções obtidas pelo modelo PLIM mais econômicas, do ponto de vista do transporte. Estas reduções de custos, relativa à diferença entre os modelos SIG e PLIM, foram da ordem de 8%, 23% e 37%, para as Simulações I, II e III, consideradas como de pequeno, médio e grande porte, respectivamente. Percebe-se que, à medida que as dimensões, e conseqüentemente a complexidade, do problema aumentam, o modelo SIG tem sua habilidade de localizar e alocar a demanda à oferta, obedecendo aos limites de capacidade das instalações, reduzida, gerando soluções de maiores custos de transporte, se comparadas às soluções obtidas pelo modelo PLIM, em sua rotina CRC. Conclui-se que o modelo SIG empregado possui, como principal desvantagem, a seqüência de suas rotinas Localização de Facilidades e Problema do Transporte. Sendo assim, a hipótese inicial de que a forma indireta do modelo SIG ao tratar o problema de localização-alocação de instalações gera desvantagens na geração das soluções, foi confirmada.

As questões de quantidade e localização das instalações, suas respectivas capacidades, e a alocação entre centros de demanda e oferta devem ser tratadas no mesmo problema, de forma simultânea. O modelo PLIM desenvolvido encontrou soluções para o problema seguindo esta linha de raciocínio, o que significa dizer que tratou todas as questões de forma conjunta na modelagem da função objetivo e restrições. O mesmo fato não ocorreu com a abordagem dada no modelo SIG. A seqüência utilizada tornou a rotina Problema do Transporte dependente da configuração inicial gerada pela rotina Localização de Facilidades, não sendo possível alterar as localizações das instalações obtidas como dados de entrada, o que tornou os custos de transporte mais elevados, se comparados com o modelo PLIM.

Em contrapartida, modelos de programação matemática exata, tal como o modelo PLIM, possui, como fator limitante, o tempo de processamento para encontrar a solução matemática ótima do problema. Já modelos baseados em técnicas heurísticas, como o modelo SIG, por

não executarem buscas exaustivas em torno da melhor solução, constituem abordagens mais viáveis para o tratamento de problemas de localização de grande porte, que envolvem ampla gama de variáveis e restrições, dado que a complexidade do algoritmo de solução se eleva de forma exponencial. Constatou-se que, para o modelo PLIM executar as Simulações II e III em tempo computacional razoável, foi necessário reduzir o número de alternativas possíveis, redimensionando o número de candidatos à localização de instalações, por exemplo. Porém, a busca pela melhor solução fica altamente condicionada a esta escolha por candidatos, que deve ser efetuada de forma lógica e racional.

Sendo assim, foi avaliada a eficácia do modelo SIG, medida em termos de tempo de processamento computacional, para a geração das soluções. Os tempos de processamento computacional consumidos pelo modelo SIG, para qualquer um dos cenários simulados, foi inferior a 5 segundos, devendo ser acrescentado ainda o tempo de preparação dos dados e escolha das alternativas. Este é um ponto relevante que identifica uma vantagem na aplicação do modelo SIG, dada sua rapidez na geração de respostas, definindo-o como um sistema de apoio à decisão espacial (SADE). Em contrapartida, o modelo PLIM consumiu um tempo máximo de processamento de 2 horas, 44 minutos e 10 segundos para a abertura de três novos CD's, proposto no Cenário 4 da Simulação II, em sua rotina SRC, gerando uma relativa desvantagem se comparado ao SIG.

No que tange à interação entre o SIG e o modelo PLIM, durante os momentos de entrada e saída de dados, foi constatada a grande potencialidade do SIG em manipular dados geográficos e gerar visualização gráfica. O SIG possui capacidade em integrar grandes quantidades de informação sobre o problema que se deseja tratar e prover um repertório de ferramentas analíticas para explorar estes dados, o que facilita, por exemplo, a criação da matriz de distâncias entre os pontos da rede, a partir de uma malha viária. Esta matriz, também chamada matriz de custos, foi utilizada em ambos os modelos.

Com relação à saída de dados, o SIG permitiu a criação de mapas temáticos, através da união de informações da base de dados ao mapa. Os mapas temáticos apresentam uma visão gráfica espacial que facilitam a compreensão e interpretação das análises espaciais, se comparada a um relatório textual, principalmente quando se dispõe de grandes volumes de dados, favorecendo a um elevado número de comparações entre alternativas.

7.1 Recomendações para trabalhos futuros

Neste trabalho, para proceder à comparação entre o modelo SIG de localização-alocação de instalações, utilizou-se de uma técnica exata, baseada em Programação Linear Inteira Mista. Propõe-se para trabalhos futuros que sejam desenvolvidas, além de modelos exatos, técnicas heurísticas para avaliação da solução e desempenho do modelo. As técnicas heurísticas, apesar de não garantirem a solução ótima, são eficientes na resolução de problemas de grande porte, não sendo necessário reduzir o número de variáveis envolvidas, tal como o número de candidatos à localização, gerando respostas em intervalos de tempo relativamente curtos.

Recomenda-se que o modelo externo desenvolvido, caso produza melhores soluções de localização e alocação que o SIG analisado, seja realmente integrado a este, por meio do estabelecimento de uma interface automática, compondo um novo módulo de aplicação a problemas de transporte. Seria interessante, além de reduzir os custos de transporte, relacionado a distâncias ou tempos de viagem, abordar outros tipos de custos, como custos de instalações, terrenos, rodovias, estoques, armazenagem e movimentação de materiais, administração etc., ou até mesmo considerações sociais, políticas e ambientais, baseadas em zoneamentos e nível de acessibilidade, por exemplo. Ressalta-se ainda a incorporação da questão temporal, que envolve os dados nas análises de decisões. Geralmente, estes dados referem-se apenas ao passado e presente, não havendo projeções para demandas futuras, no intuito de estimar a necessidade de instalações.

A facilidade em manipular dados geográficos e gerar visualização gráfica são vantagens de qualquer SIG, destacadas neste trabalho para o SIG TransCAD. Sendo assim, as conclusões obtidas nesta pesquisa estão limitadas especificamente para este *software* e suas rotinas internas para a solução do problema. Fica como recomendação para trabalhos futuros a avaliação da qualidade da solução de outros *softwares* SIG's para o tratamento do problema de localização-alocação de instalações.

Referências Bibliográficas

ARAKAKI, R.G.I.; LORENA, L.A.N. Uma heurística de localização-alocação (HLA) para problemas de localização de facilidades. **Revista Produção**, São Paulo: Abepro, v.16, n.2, p. 319-328, 2006.

BALLOU, R.H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos**: planejamento, organização e logística empresarial. 5. ed. Tradução: Elias Pereira. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BERTRAND, J.W.M.; FRANSOO, J.C. Modelling and Simulation: Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v.22, n.02, p.241-264, 2002.

BOWERSOX, D.J.; CLOSS, D.J. Logística Empresarial: O processo de integração da cadeia de suprimento. São Paulo: Atlas, 2001.

BRITO, J.A.M.; MONTENEGRO, F.M.T.; BRITO, L.R. Aplicação de algoritmos GRASP e genéticos ao problema de localização de estações de rádio base. **In: XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional** – SBPO, Gramado, RS, p. 1282-1294, 2005.

CALIPER. Routing and Logistics with TransCAD 3.0. Newton, Massachusetts, Caliper Corporation, 1996.

CAMARGO, P.V.; CUNHA, C.B. Uma heurística eficiente para a determinação de agrupamentos ("clusters") com restrição de capacidade em ambiente de planilha eletrônica. **In: Congresso Anual da ANPET – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**, 20., Brasília, DF. Anais, pp.1437-1448, 2006.

CARRARA, C.M.; AGUIAR, E.M.; FARIA, C.A. Localização de terminais logísticos urbanos com o uso de ferramentas SIG: aplicação à cidade de Uberlândia. In: Congresso Anual da ANPET – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 20., Brasília, DF. Anais, pp.1497-1508, 2006.

CHURCH, R.L. Geographical Information Systems and location science. Computers & Operations Research, v. 29, p. 541-562, 2002.

CHURCH, R.L.; SORENSEN, P. Integrating normative location models into GIS: problems and prospects with the p-median model. In: Longley P, Batty M. (eds). **Spatial Analysis: modeling in a GIS environment**. Cambridge, UK: GeoInformation International, p.167-183, 1996.

CRAINIC, T.G. A survey of optimization models for long-haul freight transportation. Publicação CRT-98-67, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, Montréal, QC, Canadá, 1998.

DOBRUSKY, F.G. **Optimal Location of cross-docking centers for a distribution network in Argentina.** 81p. Dissertação (Mestrado em Logística) - Massachusetts Institute of Tecnology, June, 2003.

- DUTRA, N.G.S. **Planejando uma rede escolar municipal para reduzir custos de deslocamentos.** Dissertação (Mestrado em Transportes) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- EASTMAN, J. **Manual do usuário.** Idrisi for Windows, versão 2.0, Centro de Recursos Idrisi, UFRGS, Porto Alegre, 1998.
- ENOMOTO, L.M. Análise da distribuição física e roteirização em um atacadista do sul de Minas Gerais. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Produção) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.
- FEO, T.A.; RESENDE, M.G.C. Greedy randomized adaptive search procedures, **Journal of Global Optimization**, v.6, n.2, p.109-133, 1995.
- FLEURY, P.F.; WANKE, P.; FIGUEIREDO, K.F. **Logística Empresarial**: a perspectiva brasileira. 1.ed. São Paulo: Atlas, 2000.
- GLOVER, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. **Computers and Operations Research**, v.13, n.5, p.533-549, 1986.
- HAMAD, R. Modelo para localização de instalações em escala global envolvendo vários elos da cadeia logística. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- HANSEN, P. The steepest ascent mildest descent heuristic for combinatorial programming. In: Congress on Numerical Methods in Combinatorial Optimization, Capri, Italy, 1986.
- HOFFMANN, L.T.; GÓMEZ, A.T. Uma abordagem do problema de localização de torres de rádio transmissão auxiliado por um Sistema de Informação Geográfica. **In: XXXV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional SBPO**, Natal, RN, p. 1538-1548, 2003.
- HOLLAND, J.H. Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Press, 1975.
- KIRKPATRICK, S.; GELATT, D.C.; VECCHI, M.P. Optimization by Simulated Annealing. **Science**, v.220, n. 4598, p.671-680, 1983.
- KLISKEY, A.D. The role and functionality of GIS as a planning tool in natural-resource management. **Computers, Environmental and Urban Systems**, v.19, n.1, p.15-22, 1995.
- LACERDA, L. Considerações sobre o estudo de localização de instalações. **Artigo do Centro de Estudos em Logística** COPPEAD Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999. Disponível em: http://www.cel.coppead.ufrj.br/fs-public.htm. Acesso em 04 de setembro de 2006.
- LIMA, D.F.; RANGEL, S. ORMAPS: um SAD para os problemas de localização. In: XXXIV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional SBPO, Rio de Janeiro, RJ, 2002.
- LIMA, M.V.A.; LOPES, A.L.M.; ENSSLIN, L. Reflexões sobre a validação do processo de apoio à decisão. **In: XXXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional SBPO**, São João Del Rei, MG, p. 1147-1158, 2004.

- LIMA, R.S. Bases para uma metodologia de apoio à decisão para serviços de educação e saúde sob a ótica dos transportes. Tese (Doutorado em Transportes) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- LORENA, L.A.N.; SENNE, E.L.F.; PAIVA, J.A.C.; PEREIRA, M.A. Integração de modelos de localização a Sistemas de Informações Geográficas. **Gestão e Produção**, v.8, n.2, p.180-195, 2001.
- MLADENOVIC, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. **Computers and Operations Research**, v.24, n.11, p.1097-1100, 1997.
- MORGADO, A.V.; PORTUGAL, L.S.; LIMA JR., O.F. Procedimento para localização de terminais rodoviários regionais coletivos de carga. **In: III Rio de Transportes**, 2005, Rio de Janeiro. III Rio de Transportes, 2005.
- NARUO, M.K. O estudo do consórcio entre os municípios de pequeno porte para disposição final de resíduos sólidos urbanos utilizando Sistemas de Informações Geográficas. Dissertação (Mestrado em Transportes) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- NOVAES, A.G. Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição: estratégia, operação e avaliação. 2.ed. Rio de Janeiro: Campus, 2004.
- OWEN, S.H.; DASKIN, M.S. Strategic facility location: a review. **European Journal of Operational Research**, n.111, p.423-447, 1998.
- PESSE, R.; GALVÃO, R.D. Sistemas georeferenciados de apoio à decisão espacial via internet. **In: XXXV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional SBPO**, Natal, RN, p. 1030-1041, 2003.
- PIRES, T. Configuração de uma rede de distribuição capacitada com restrição de cobertura. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- PIZZOLATO, N.D.; SILVA, H.B.F. The location of public schools: evaluation of Practical Experiences. **International Transactions in Operational Research,** v.4, n.1, p.13-22, 1997.
- RAMOS, R.A.R. Localização industrial: um modelo espacial para o noroeste de **Portugal**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2000.
- RIBEIRO, C.C. Metaheuristics and Applications. In: **Advanced School on Artificial Intelligence**, Estoril, Portugal, 1996.
- RORATO, R.J. Alternativas de transporte rodo-marítimo na distribuição de cargas frigoríficas no Brasil. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Transportes) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- ROSE, A. Uma avaliação comparativa de alguns sistemas de informação geográfica aplicados aos transportes. Dissertação (Mestrado em Transportes) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

- SILVA, E.L.; MENEZES, E.M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4ª ed. rev. atual. Florianópolis: UFSC, 138p, 2005.
- SILVA, J.L.C.; OLIVEIRA FILHO, O.M. Método prático para resolução do problema de localização de facilidades capacitado. In: **XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional SBPO**, Gramado, RS, p. 2129-2139, 2005.
- SILVA, M.R. Uma contribuição ao problema de localização de terminais de consolidação no transporte de carga parcelada. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- THILL, J.-C. Geographic Information Systems for transportation in perspective. **Transportation Research Part C,** n.8, p. 03-12, 2000.
- TUBINO, D.F. **Sistemas de Produção**: a produtividade no chão de fábrica. Porto Alegre: Bookman, 1999.
- VALLIM FILHO, A.R.A. Localização de centros de distribuição de carga: contribuições à modelagem matemática. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- YEH, A.G.-O.; CHOW, M.H. An integrated GIS and location-allocation approach to public facilities planning: an example of open space planning. **Computers, Environmental and Urban Systems,** v.20, n.4-5, p.339-350, 1996.

$Anexo\,A$ - Relação dos municípios considerados para a Simulação II

Número	Longitude	Latitude	Município-Cliente	Demanda (Kg)	Estado
1	-46978611	-22059444	AGUAI	5410	SP
2	-46716667	-21936667	AGUAS DA PRATA	2865	SP
3	-46632778	-22476389	AGUAS DE LINDOIA	20840	SP
4	-45947222	-21429167	ALFENAS	11768	MG
5	-46388056	-20863611	ALPINOPOLIS	1526	MG
6			ALTEROSA	238	MG
7	-47373889	-21025556	ALTINOPOLIS	2334	SP
8	-47331389	-22739167	AMERICANA	41754	SP
9	-48101667	-21724444	AMERICO BRASILIENSE	20079	SP
10		-22701111		23881	SP
11	-47663056	-22126389	ANALANDIA	4584	SP
12	-46569167	-22068056	ANDRADAS	7208	MG
13			APARECIDA	11337	SP
14			ARACOIABA DA SERRA	4426	SP
15			ARARAQUARA	69164	SP
16		-22356944		35829	SP
17		-21358611		8876	MG
18			ARIRANHA	156	SP
19			ARTUR NOGUEIRA	36074	SP
20		-23116944		31822	SP
21			BADY BASSITT	1855	SP
22			BAEPENDI	5619	MG
23			BANDEIRA DO SUL	2126	MG
24		-22074444		17162	SP
25			BARRETOS	7066	SP
26			BARRINHA	18151	SP
27		-20891111		12921	SP
28		-22314722		10154	SP
29			BEBEDOURO	19169	SP
30			BOA ESPERANCA	16558	MG
31			BOA ESPERANCA DO SUL	20100	SP
32		-22136111		5494	SP
33		-23283333		15398	SP
34			BOM JESUS DOS PERDOES	2957	SP
35			BORACEIA	206	SP
36			BORBOREMA	2657	SP
37			BORDA DA MATA	3935	MG
38			BOTELHOS	4201	MG
39			BRAGANCA PAULISTA	52280	SP
40			BRASOPOLIS	8805	MG
			BRODOSQUI	5355	SP
41 42		-20991369		7540	SP
			BUENO BRANDAO		
43 44				4312 6279	MG SP
			BURITIZAL CARO VERDE		
45			CABO VERDE	2716	MG
46			CABREUVA	25827	SP
47	-45/06944	-23100833	CACAPAVA	24733	SP

Número	Longitude	Latitude	Município-Cliente	Demanda (Kg)	Estado
49	-45009444	-22665000	CACHOEIRA PAULISTA	10588	SP
50	-46643889	-21529444	CACONDE	9583	SP
51	-48809444	-20879722	CAJOBI	6164	SP
52	-47304167	-21275278	CAJURU	1151	SP
53	-46386111	-21923611	CALDAS	5263	MG
54	-46144722	-22755278	CAMANDUCAIA	4169	MG
55	-46057500	-22612222	CAMBUI	9158	MG
56	-45295833	-21852222	CAMBUQUIRA	1668	MG
57	-45400556	-21836111	CAMPANHA	2178	MG
58	-46246389	-21711111	CAMPESTRE	7756	MG
59	-47060833	-22905556	CAMPINAS	333907	SP
60			CAMPO BELO	9417	MG
61			CAMPO DO MEIO	2104	MG
62			CAMPO LIMPO PAULISTA	38651	SP
63			CAMPOS DO JORDAO	17906	SP
64			CAMPOS GERAIS	6828	MG
65			CANDEIAS	2645	MG
66			CAPELA DO ALTO	2918	SP
67		-22995000		11660	SP
68			CARMO DO RIO CLARO	2726	MG
69			CASA BRANCA	8782	SP
70		-20583056		1302	MG
71			CATANDUVA	3726	SP
72		-21977222		7248	MG
73			CERQUILHO	12220	SP
74			CESARIO LANGE	23099	SP
75			CHARQUEADA	3736	SP
76			CONCEICAO DA APARECIDA	750	MG
77			CONCEICAO DAS PEDRAS	3102	MG
78			CONCEICAO DO RIO VERDE	3068	MG
79			CONCEICAO DOS OUROS	3358	MG
80		-22330278		17134	SP
81			CONCHAS	3447	SP
82			CONGONHAL	5041	MG
83			CORDEIROPOLIS	8188	SP
84			CORREGO DO BOM JESUS	754	MG
85			CORUMBATAI	8432	SP
86			COSMOPOLIS	12340	SP
87			CRAVINHOS	5600	SP
88		-22211944		3925	MG
89			CRUZEIRO	43053	SP
90		-21838611		4489	MG
91		-23074444		33563	SP
92			DELFIM MOREIRA	987	MG
93			DESCALVADO	8410	SP
94			DIVINOLANDIA	7131	SP
95			DIVISA NOVA	160	MG
96			DOIS CORREGOS	8383	SP
96			DOURADO	6534	SP
		-21236389		1830	SP
98	-4/9/3333	-21230369	ואוטואוטען	1030	<u>ه۲</u>

Número	Longitude	Latitude	Município-Cliente	Demanda (Kg)	Estado
100	-45565278	-21610000	ELOI MENDES	2596	MG
101	-47215000	-22488333	ENGENHEIRO COELHO	3954	SP
102	-46741389	-22190833	ESPIRITO SANTO DO PINHAL	27259	SP
103	-46017222	-22462778	ESTIVA	3392	MG
104	-46318333	-22854722	EXTREMA	10362	MG
105	-48685278	-21264444	FERNANDO PRESTES	4183	SP
106	-47400833	-20538611	FRANCA	26604	SP
107	-48310556	-20318333	GUAIRA	6087	SP
108	-45917500	-20761667	GUAPE	2129	MG
109	-47824167	-20428333	GUARA	7545	SP
110	-48944722	-20498611	GUARACI	2818	SP
111			GUARANESIA	1339	MG
112			GUARAREMA	447	SP
113			GUARATINGUETA	20463	SP
114		-23372778		3099	SP
115		-21360000		7163	SP
116			GUATAPARA	505	SP
117		-21305278		14065	MG
118			HELIODORA	1430	MG
119			HOLAMBRA	5115	SP
120			HORTOLANDIA	20473	SP
121		-21954722		11954	SP
122		-21080278		2459	SP
123		-21757778		15668	SP
124			IGARAPAVA	7556	SP
125		-21170000		572	MG
126		-20935833		1297	MG
127			INCONFIDENTES	2128	MG
128			INDAIATUBA	80012	SP
129		-23350278		2680	SP
130		-22435833		2753	SP
131		-20438056		1617	SP
132			IRACEMAPOLIS	6179	SP
133		-21318056		453	SP
134		-21981111		1406	SP
135		-22425556		45666	MG
136		-21078056		4802	MG
137			ITAMONTE	6369	MG
138			ITANHANDU	1987	MG
139			ITAPETININGA	16057	SP
140		-23982222		3912	SP
141		-22436111		40221	SP
142		-21595556		13683	SP
		-21395556			SP
143 144			ITALIBA ITAU DE MINAS	33196	
				371	MG
145		-22252778		2792	SP
146		-21736944		7336	SP
147		-23264167		39704	SP
148		-23153056		13938	SP
149	-4//80556	-20339444	ITUVERAVA	2545	SP

Número	Longitude	Latitude	Município-Cliente	Demanda (Kg)	Estado
151	-45965833		-	8965	SP
152	-46612222	-22285556	JACUTINGA	4597	MG
153	-46985833	-22705556	JAGUARIUNA	8264	SP
154	-45687778	-23253611	JAMBEIRO	1170	SP
155	-47763889	-21017778	JARDINOPOLIS	6418	SP
156	-46728333	-23101389	JARINU	15443	SP
157	-48557778	-22296389	JAU	7366	SP
158	-46275556	-22930278	JOANOPOLIS	1874	SP
159	-46884167	-23186389	JUNDIAI	89676	SP
160	-47836667	-23049722	LARANJAL PAULISTA	5721	SP
161	-44999722	-21245278	LAVRAS	12298	MG
162	-44902222	-22570833	LAVRINHAS	2157	SP
163	-47390278	-22185556	LEME	97717	SP
164	-47401667	-22564722	LIMEIRA	45249	SP
165	-46650000	-22523056	LINDOIA	7690	SP
166	-45124722			18217	SP
167	-46950556	-23086389	LOUVEIRA	22004	SP
168			LUIS ANTONIO	6585	SP
169			MACHADO	14154	MG
170			MARIA DA FE	1821	MG
171	-48365833	-21603333	MATAO	9430	SP
172			MIGUELOPOLIS	3004	SP
173			MINEIROS DO TIETE	1249	SP
174			MIRASSOL	658	SP
175	-47004722			21077	SP
176			MOJI-GUACU	70471	SP
177			MOJI-MIRIM	17511	SP
178			MOMBUCA	669	SP
179	-45541111	-21757500	MONSENHOR PAULO	1223	MG
180	-46680833	-22681944	MONTE ALEGRE DO SUL	2563	SP
181			MONTE ALTO	6184	SP
182			MONTE AZUL PAULISTA	1838	SP
183	-46367500	-21326389	MONTE BELO	2119	MG
184	-47316111	-22946667	MONTE MOR	5916	SP
185	-46980278	-21189722	MONTE SANTO DE MINAS	4354	MG
186	-46572500	-22432500	MONTE SIAO	3703	MG
187	-48057778	-20731389	MORRO AGUDO	1165	SP
188	-46791667	-22880000	MORUNGABA	8233	SP
189	-48151111			728	SP
190	-46525556	-21375833	MUZAMBINHO	997	MG
191	-45511667	-22120000	NATERCIA	1194	MG
192	-46395000	-23181111	NAZARE PAULISTA	2334	SP
193	-45235833	-21235833	NEPOMUCENO	5215	MG
194			NOVA EUROPA	3643	SP
195			NOVA ODESSA	16153	SP
196			NOVO HORIZONTE	5213	SP
197			NUPORANGA	3021	SP
198	-48914722			15119	SP
199			ORLANDIA	4551	SP
200			OURO FINO	13395	MG

Número	Longitude	Latitude	Município-Cliente	Demanda (Kg)	Estado
202			PARAIBUNA	5837	SP
203	-45780000	-22554167	PARAISOPOLIS	7476	MG
204	-44966667	-22390278	PASSA QUATRO	5885	MG
205		-20718889		459	MG
206	-47281667	-20639444	PATROCINIO PAULISTA	1488	SP
207	-47154167	-22761111	PAULINIA	23062	SP
208			PEDERNEIRAS	183	SP
209	-46443056	-22793056	PEDRA BELA	4609	SP
210			PEDRALVA	2017	MG
211			PEDREGULHO	1942	SP
212			PEDREIRA	8257	SP
213		-21090833		2355	MG
214			PEREIRAS	1260	SP
215		-23711944		2770	SP
216			PILAR DO SUL	4670	SP
217			PINDAMONHANGABA	19439	SP
218			PINDORAMA	1317	SP
219			PINHALZINHO	5143	SP
220		-22613611		16966	SP
221		-23053889		458	SP
222			PIRACICABA	115340	SP
223			PIRACUNUNGA	70859	SP
224		-21091389		196	SP
225			PIRANGUCU	1200	MG
226			PIRANGUINHO	391	MG
227			PITANGUEIRAS	8442	SP
228			POCO FUNDO	2174	MG
229			POCOS DE CALDAS	58681	MG
230		-21022500		1204	SP
231			PORTO FELIZ	13322	SP
232			PORTO FERREIRA	17825	SP
233		-22842778		1746	SP
234			POUSO ALEGRE	20438	MG
235			POUSO ALTO	2707	MG
236			PRADOPOLIS	369	SP
237		-23011667		1131	SP
238			RIBEIRAO BONITO	13612	SP
239			RIBEIRAO PRETO	31659	SP
240			RIBEIRAO VERMELHO	998	MG
241		-21586944		3504	SP
242			RIO CLARO	24763	SP
243			RIO DAS PEDRAS	3297	SP
244			SALES OLIVEIRA	529	SP
245	1		SALTINHO	3185	SP
245		-23200833		44723	SP
247			SALTO DE PIRAPORA	480	SP
247			SANTA ADELIA	5882	SP
249			SANTA BARBARA D'OESTE	48428	SP
250			SANTA BRANCA	3708	SP
250			SANTA CRUZ DA CONCEICAO		SP
20 I	-47451944	-221402/8	DANTA UNUL DA CUNCEICAU	2261) OF

Número	Longitude	Latitude	Município-Cliente	Demanda (Kg)	Estado
253	-48390833	-21462778	SANTA ERNESTINA	4658	SP
254	-47530278	-22456667	SANTA GERTRUDES	8568	SP
255	-48084167	-21685000	SANTA LUCIA	8476	SP
256	-46336667	-22028611	SANTA RITA DE CALDAS	1352	MG
257	-47478056	-21710278	SANTA RITA DO PASSA QUATRO	22845	SP
258	-45703333	-22252222	SANTA RITA DO SAPUCAI	7851	MG
259	-47363056	-21472778	SANTA ROSA DE VITERBO	15456	SP
260	-45506667	-21249167	SANTANA DA VARGEM	696	MG
261	-46919444	-22606111	SANTO ANTONIO DE POSSE	6075	SP
262			SANTO ANTONIO DO JARDIM	1216	SP
263			SANTO ANTONIO DO PINHAL	4625	SP
264			SAO BENTO DO SAPUCAI	6339	SP
265			SAO CARLOS	52835	SP
266			SAO GONCALO DO SAPUCAI	5956	MG
267			SAO JOAO DA BOA VISTA	18923	SP
268			SAO JOAQUIM DA BARRA	4653	SP
269			SAO JOSE DO RIO PARDO	12792	SP
270			SAO JOSE DO RIO PRETO	21819	SP
271			SAO JOSE DOS CAMPOS	52696	SP
272			SAO LOURENCO	9515	MG
			SAO PEDRO	9492	SP
273					
274			SAO SEBASTIAO DA GRAMA	5683	SP
275			SAO SEBASTIAO DO PARAISO	6667	MG
276			SAO SIMAO	360	SP
277			SENADOR JOSE BENTO	694	MG
278			SERRA NEGRA	23250	SP
279		-21211389		4644	SP
280			SERRANIA	6856	MG
281			SERTAOZINHO	4154	SP
282			SEVERINIA	6659	SP
283			SILVIANOPOLIS	630	MG
284			SOCORRO	20875	SP
285			SOLEDADE DE MINAS	825	MG
286			SOROCABA	55954	SP
287		-22822222		32816	SP
288			TABATINGA	3954	SP
289	-48451667	-21123889	TAIUVA	1950	SP
290	-47274444	-21705000	TAMBAU	8009	SP
291	-46748611	-21468333	TAPIRATIBA	3786	SP
292	-48504722	-21406111	TAQUARITINGA	13563	SP
293	-47856944	-23355556	TATUI	8998	SP
294	-45555278	-23026389	TAUBATE	25286	SP
295	-47714722	-23101944	TIETE	5904	SP
296	-48169167	-22426111	TORRINHA	7156	SP
297	-45549444	-22958333	TREMEMBE	1785	SP
298	-45253333	-21696944	TRES CORACOES	122	MG
299			TRES PONTAS	6850	MG
300		-20952778		2372	SP
301		-21201667		520	SP
302			VALINHOS	29328	SP

Número	Longitude	Latitude	Município-Cliente	Demanda (Kg)	Estado
304	-46893611	-21832222	VARGEM GRANDE DO SUL	12833	SP
305	-45430278	-21551389	VARGINHA	11442	MG
306	-46828333	-23211389	VARZEA PAULISTA	31926	SP
307	-46975278	-23029722	VINHEDO	18075	SP
308	-48296944	-20873056	VIRADOURO	455	SP
309	-45091667	-22333333	VIRGINIA	3114	MG
310	-48629167	-21170556	VISTA ALEGRE DO ALTO	129	SP
311	-47437778	-23546667	VOTORANTIM	12442	SP