



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA APLICADA

AMARILDO JEIELE FERREIRA DE LUCENA

LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES
MULTI-PERÍODOS APLICADA À ALOCAÇÃO DE
VIATURAS POLICIAIS

RECIFE – PE

2017

AMARILDO JEIELE FERREIRA DE LUCENA

**LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES
MULTI-PERÍODOS APLICADA À ALOCAÇÃO DE
VIATURAS POLICIAIS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Informática Aplicada do Departamento de Estatística e Informática da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Informática Aplicada.

ORIENTADOR: Silvana Bocanegra

RECIFE – PE

2017

Ilustrações (Imagem, tabela, mapa etc.) Sim

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

L935I Lucena, Amarildo Jeiele Ferreira de.
Localização de instalações multi-períodos aplicada à alocação de viaturas policiais / Amarildo Jeiele Ferreira de Lucena. – Recife, 2017.
89 f.: il.

Orientador(a): Silvana Bocanegra.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada, Recife, BR-PE, 2017.
Inclui referências, anexo(s) e apêndice(s).

1. Pesquisa operacional 2. Modelagem matemática 3. Segurança pública
I. Bocanegra, Silvana, orient. II. Título

CDD 004

AMARILDO JEIELE FERREIRA DE LUCENA

LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES
MULTI-PERÍODOS APLICADA À ALOCAÇÃO DE
VIATURAS POLICIAIS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Informática Aplicada do Departamento de Estatística e Informática da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Informática Aplicada.

Aprovada em: 31 de Agosto de 2017.

BANCA EXAMINADORA

Silvana Bocanegra (Orientadora)
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE
Departamento de Estatística e Informática Aplicada – DEINFO

Glauco Estácio Gonçalves
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE
Departamento de Estatística e Informática Aplicada – DEINFO

Ricardo Martins de Abreu Silva
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
Centro de Informática – CIn

À
meu filho Amaury Kleber, que
sirva de inspiração para suas con-
quistas no campo da educação.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à minha família, pelo apoio, paciência e por terem compreendido minha ausência durante o período em que precisei manter-me afastado do seio familiar. A busca pelo conhecimento passa obrigatoriamente pelo compartilhamento de informações e experiências de vida. Agradeço aos meus colegas da Turma 2015 do Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada pelo escambo de informações durante o período em que estivemos juntos nesse programa. Por fim, externo minha imensa gratidão à todos que compõem o corpo docente e técnico deste programa e, de maneira especial, à Professora Silvana Bocanegra que me guiou pacientemente na busca pelo sucesso neste trabalho.

Resumo

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar modelos matemáticos que possam vir a contribuir para a alocação de viaturas policiais em centros urbanos. Foram revisados os modelos básicos para localização de instalações, assim como um modelo de localização-alocação multi-períodos, que considera a variação das ocorrências e disponibilidade de viaturas em múltiplos períodos de tempo. Três modelos foram implementados no software Advanced Interactive Multidimensional Modeling System (AIMMS), como forma de oferecer uma ferramenta que venha a contribuir com os gestores da área. Foram utilizados dados de dois municípios, a cidade de Caicó-RN e Recife-PE. Com os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, conclui-se que a utilização dos modelos de localização-alocação de instalações apresentados neste trabalho apresentam contribuições referentes a gestão do custo total de deslocamento e ao número de viaturas à serem alocadas.

Palavras-chave: Pesquisa Operacional. Modelagem Matemática. Localização de Instalações. Segurança Pública.

Abstract

This work was developed with the objective of evaluating mathematical models that may contribute to the allocation of police vehicles in urban centers. We reviewed the basic models for location of facilities, as well as a multi-period location-allocation model, which considers the variation of occurrences and availability of vehicles in multiple time periods. We implemented three models in the AIMMS software, as a way to offer a tool that will contribute to the managers of the area. We used data from two municipalities, the city of Caicó-RN and Recife-PE. With the results obtained in the development of this work, we conclude that the use of the location-allocation models presented in this paper offer contributions regarding the management of the total cost of displacement and the number of vehicles to be allocated.

Keywords: Operations Research. Mathematical Modeling. Facility Location. Public Safety.

Lista de Tabelas

4.1	Matriz de Distâncias entre Pontos de Ocorrências × Candidatos à Instalação	42
4.2	Ocorrências por turnos - Cenário 1.	43
4.3	Resultados do Cenário 1.	44
4.4	Alocação de viaturas por período (Problema de Localização-Alocação Multi-Período (PLMP)) - Cenário 1.	45
4.5	Ocorrências por turnos - Cenário 2.	46
4.6	Restrição distância x Pontos candidatos à localização-alocação de viaturas. .	46
4.7	Viaturas Alocadas - Restrição 900m entre pontos candidatos (PLMP).	53
4.8	Ocorrências por turnos - Cenário 3.	53
4.9	(PLMP) Restrição 900m entre os pontos candidatos.	58
B.1	Custo total, Ocorrência atendida e Viaturas alocadas <i>versus</i> Raio de cobertura (Cenário 2 - Problema de Localização de Máxima Cobertura (PLMC)). . . .	69
C.1	Cenário 2 - Restrição 900m entre os pontos candidatos	70
C.2	Cenário 2 - Restrição 800m entre os pontos candidatos	71
C.3	Cenário 2 - Restrição 700m entre os pontos candidatos	72
C.4	Cenário 2 - Restrição 600m entre os pontos candidatos	73
C.5	Cenário 2 - Restrição 500m entre os pontos candidatos	74

C.6	Cenário 3 - Restrição 900m entre os pontos candidatos	75
C.7	Cenário 3 - Restrição 800m entre os pontos candidatos	76
C.8	Cenário 3 - Restrição 700m entre os pontos candidatos	77
C.9	Cenário 3 - Restrição 600m entre os pontos candidatos	78
C.10	Cenário 3 - Restrição 500m entre os pontos candidatos	79
D.1	Custo Total de Deslocamento e Raio de Cobertura <i>versus</i> Viaturas Alocadas (Cenário 2 - Problema de Localização p-Mediana Capacitada (PLpMC)). . .	81

Lista de Figuras

3.1	Tela de gerenciamento das seções no AIMMS.	26
3.2	Tela de visualização do mapa no AIMMS.	26
3.3	Tela de visualização e criação de parâmetros e variáveis no AIMMS.	27
3.4	Tela de criação de <i>procedures</i> no AIMMS.	27
3.5	Tela de visualização de dados no AIMMS.	28
3.6	Visualização dos valores dos parâmetros no AIMMS.	29
3.7	Visualização dos valores das variáveis no AIMMS.	29
3.8	Tela do modelo de máxima cobertura (Visualização usuário).	30
3.9	Tela do modelo p-mediana capacitado (Visualização usuário).	30
3.10	Tela do modelo de localização de viaturas multi-período (Visualização usuário).	30
4.1	Limites do Município de Caicó.	32
4.2	Distribuição Anual de Ocorrências em Caicó.	34
4.3	Distribuição Turno/Mês (Janeiro) de Ocorrências em Caicó.	35
4.4	Distribuição Turno/Dias (Janeiro/2015) de Ocorrências em Caicó.	35
4.5	Limites do Município e bairros de Recife.	36
4.6	Resultados da simulação com base nos registros de Caicó.	38
4.7	Resultados da simulação com base nos registros de Recife.	39

4.8	Pontos de ocorrências policiais nos bairros de Caicó (AIMMS).	40
4.9	Pontos para localização-alocação de viaturas em Caicó (AIMMS).	40
4.10	Pontos para alocação de viaturas no Recife.	41
4.11	Custo Total Deslocamento × Raio de Cobertura.	47
4.12	Ocorrências Atendidas × Raio de Cobertura.	48
4.13	Viaturas Alocadas × Raio de Cobertura.	49
4.14	Custo Total de Deslocamento × Viaturas Alocadas.	50
4.15	Raio de Cobertura × Viaturas Alocadas.	50
4.16	Custo Total de Deslocamento × Viaturas Alocadas. Destaque para os cenários de 900m e 600m	51
4.17	Cenário 02 - Variação do custo total <i>versus</i> Viaturas disponíveis.	52
4.18	Custo Total Deslocamento × Raio de Cobertura.	54
4.19	Ocorrências Atendidas × Raio de Cobertura.	54
4.20	Viaturas Alocadas × Raio de Cobertura.	55
4.21	Custo Total de Deslocamento × Viaturas Alocadas.	56
4.22	Raio de Cobertura × Viaturas Alocadas.	56
4.23	Cenário 03 - Variação do custo total <i>versus</i> Viaturas disponíveis.	57

Lista de Abreviaturas

AIMMS	Advanced Interactive Multidimensional Modeling System
BPM	Batalhão de Polícia Militar
CRISP	Centro de Estudos de Criminalidade e Segurança Pública
COPOM	Central de Operações da Polícia Militar
CIODS	Centro Integrado de Operações de Defesa Social
CPM	Companhia de Polícia Militar
DIM	Diretoria Integrada Metropolitana
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PE	Pernambuco
PM	Polícia Militar
PMR	Prefeitura Municipal do Recife
PLMC	Problema de Localização de Máxima Cobertura
PLpMC	Problema de Localização p-Mediana Capacitada
PLMP	Problema de Localização-Alocação Multi-Período
RN	Rio Grande do Norte
SSP	Secretaria de Segurança Pública
SDS	Secretaria de Defesa Social
SIG	Sistemas de Informação Geográfica

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Apresentação	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Objetivos	3
1.4	Contribuições esperadas	3
1.5	Organização do trabalho	4
2	Modelos Básicos de Otimização Aplicados à Serviços de Emergência	5
2.1	Pesquisa Operacional e Modelagem Matemática	5
2.2	Modelos de Localização de Instalações	7
2.3	Trabalhos Relacionados	16
3	Uma proposta para solução do problema de localização-alocação de viaturas em centros urbanos	19
3.1	Modelagem Matemática	20
3.2	Previsão de demanda	22
3.3	<i>Advanced Interactive Multidimensional Modeling System (AIMMS)</i>	23
3.4	Sistemas de Informação Geográfica (SIG)	24

3.5	Aplicação	25
4	Estudo de Caso	31
4.1	Estudo de Caso Caicó-RN	31
4.2	Estudo de Caso Recife-PE	35
4.3	Parâmetros de Entrada do Modelo	37
4.3.1	Previsão de Demanda	38
4.3.2	Localização de Ocorrências e Pontos Candidatos à Localização- Alocação de Viaturas	39
4.4	Cenários Analisados	43
5	Conclusões	59
A	Bairros do Município de Caicó	67
B	Custo Total, Ocorrência Atendida e Viaturas Alocadas <i>versus</i> Raio de Cobertura - Cenário 02	68
C	Alocação de Viaturas Por Períodos	70
D	Custo Total de Deslocamento e Raio de Cobertura <i>versus</i> Viaturas Alo- cadas - Cenário 02	80
E	Implementação do Modelo no AIMMS	82
F	Autorização do Comando do 6º Batalhão de Polícia Militar (BPM)	85
G	Autorização do Comando da SDS-PE	87

Capítulo 1

Introdução

1.1 Apresentação

Nos últimos anos a segurança pública se tornou uma preocupação visível em meio a população brasileira. A ocorrência de crimes de natureza diversa pode ter contribuído para construção desse cenário, onde o crescimento desordenado das cidades é considerado um fator relevante. Beato *et. al.* [5], baseado em dados do ano 2000, publicados pelo Centro de Estudos de Criminalidade e Segurança Pública (CRISP), afirma que naquele ano já era possível identificar a relação entre o crescimento desordenado das cidades e o crescimento da criminalidade. Essa relação não é considerada um fenômeno planejado, como crime organizado, mas sim um evento de natureza desorganizada, espontânea, aleatória, despreziosa nas mais variadas expressões de banalidade.

A reorganização da sociedade, o crescimento das cidades, independente da forma ou motivos pelo qual se deu, requer investimento na reestruturação dos serviços públicos. Os investimentos em setores do serviço público é uma ação que demanda tempo, em virtude dos trâmites burocráticos do setor público. Nos casos de serviços de emergência, esses investimentos podem ser cruciais para salvar vidas, por isso a necessidade de otimizar a utilização dos recursos já disponíveis de forma mais ágil e dinâmica.

Na área dos serviços de emergência, a Polícia Militar (PM) pode exercer dois papéis, o repressivo e o preventivo. Ações repressivas são aquelas realizadas em resposta às ocorrências de delitos. Por outro lado, existem as ações em que os recursos dos serviços de emergência, se-

jam eles humanos ou mecânicos, são utilizados em operações de natureza preventiva, quando não se sabe onde ocorrerá um crime [18].

Em busca de melhorias no desempenho de suas atividades, as mais diversas áreas, sejam elas privadas ou públicas, de produção ou de serviços, têm buscado apoio nas técnicas de pesquisa operacional. Tais técnicas foram introduzidas durante a segunda guerra mundial para auxiliar no processo de tomada de decisões militares, como por exemplo, a implantação de radares e alocação de grupos de artilharia de defesa. A pesquisa operacional tem como princípio a aplicação de modelos matemáticos a fim de propiciar uma melhor utilização dos recursos (equipamentos) disponíveis.

Para auxiliar a tomada de decisão em problemas que envolvem a alocação de recursos em serviços de emergência podem ser utilizados modelos de localização-alocação de instalações. Tais modelos envolvem duas decisões de extrema importância: a primeira delas define o local onde um equipamento deve ser instalado a fim de atender a maior parcela possível da demanda (clientes/usuários dos serviços), e a segunda define quais clientes (demanda) serão atendidos por uma instalação (equipamento/recurso) em particular.

É possível identificar uma relação entre o problema do policiamento repressivo e modelos de localização de instalações. Tais modelos podem ser usados para identificar as melhores localizações para as viaturas de forma a otimizar o tempo de chegada aos locais em que ocorreram crimes, como resposta do serviço policial na solução de ocorrências policiais [24]. Também é possível identificar modelos que se relacionam aos conceitos de policiamento ostensivo, onde a preocupação é realizar um trabalho preventivo. Modelos que maximizem a área de cobertura do serviço podem prover melhor atendimento e aumento na sensação de segurança entre a população [28].

1.2 Justificativa

Dentro da perspectiva em que se encontram os serviços de emergência, em particular os de policiamento repressivo e preventivo, torna-se evidente que o uso de Pesquisa Operacional pode colaborar com uma melhor oferta desses serviços e deve ser considerado importante. Modelos de localização de instalações podem ser usados para auxiliar nesta tarefa.

O pronto atendimento às chamadas de emergência originadas pela central de aten-

dimento, ou feitas diretamente ao policial militar no decorrer do policiamento, amplia a probabilidade de prisão do infrator, diminuem a desmaterialização de provas e do cenário das ocorrências, e proporcionam sensação de segurança por parte da comunidade. A utilização dos modelos de localização de instalações podem contribuir no sentido de indicar os locais onde as viaturas devem ser alocadas, no sentido de otimizar a cobertura das áreas de patrulhamento e reduzir a distância entre os pontos base das equipes de patrulhamento e os pontos de ocorrências.

Ainda no que diz respeito a otimização dos recursos disponíveis, a aplicação de um planejamento em horizontes de tempo, pode contribuir para uma melhor gestão em relação a variação na disponibilidade das viaturas, devido os horários de descanso, refeições e pausas para manutenção das viaturas.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma proposta de ferramenta, baseada em modelos matemáticos de otimização, que possa ser utilizada para auxiliar no processo de tomada de decisão referente a localização e alocação de viaturas em centros urbanos. Será utilizado um modelo matemático de localização-alocação para decidir onde e quando alocar as viaturas com o objetivo de minimizar o custo total (tempo) de atendimento as chamadas sobre diferentes horizontes de planejamento. A modelagem e solução dos modelos matemáticos e a construção do esboço da ferramenta será feita com o software AIMMS. Para avaliar a aplicabilidade da abordagem proposta serão selecionados como estudo de caso os municípios de Caicó-RN e Recife-PE. A previsão das demandas de atendimento (ocorrências) será feita com a simulação de Monte Carlo e os mapas dos municípios serão integrados ao AIMMS utilizando o software QGIS.

1.4 Contribuições esperadas

Diante do que foi exposto na contextualização deste trabalho, espera-se que os modelos aqui apresentados possam contribuir com a otimização dos recursos disponíveis aos gestores de patrulhamento policial, possibilitando a administração destes recursos na busca

pela redução nos custos de deslocamento das viaturas, assim como, a redução no tempo de atendimento às ocorrências, considerando a alocação das viaturas em um planejamento em horizontes de tempo.

Ainda neste cenário, apresentar uma proposta de ferramenta que possa ser utilizada por usuários gestores do serviço de patrulhamento policial, sem a necessidade de conhecimento especializado em modelagem matemática. Os gestores poderão operar a interface gráfica para modificar o número máximo de viaturas que podem operar em cada período de tempo e avaliar os impactos na alocação e custo total de deslocamento.

1.5 Organização do trabalho

Apresenta-se nesse documento, além da presente introdução, outros quatro capítulos. No segundo capítulo serão introduzidos os conceitos de otimização, o problema de localização-alocação de instalações, os primeiros modelos utilizados, suas evoluções e principais aplicações. Tais modelos são relacionados aos problemas dos serviços de emergência, em especial, aos de alocação de recursos (viaturas) da PM.

O terceiro capítulo apresenta uma proposta de solução para o problema da alocação de recursos da PM, utilizando um modelo de localização-alocação de instalações aplicado em múltiplos períodos de planejamento. Neste sentido, o capítulo traz, além da descrição do modelo matemático, a descrição da técnica de simulação de Monte Carlo, utilizada para geração aleatória dos números de ocorrências, assim como, a descrição dos softwares AIMMS e QGIS utilizados na implementação da solução.

O quarto capítulo é dedicado a descrição dos estudos de casos, aplicados em primeiro momento em um cenário real no município de Caicó-RN, para validação da metodologia proposta e, no segundo momento em um cenário simulado no município de Recife-PE, para aplicação em problemas de maiores proporções.

As conclusões sobre os trabalhos realizados e a relevância dos resultados obtidos são apresentados no Capítulo 5. Neste capítulo ainda serão apresentadas sugestões para novos trabalhos que venham a receber uma parcela de contribuição deixada pelos estudos aqui descritos. Por fim, apresentamos as referências utilizadas neste trabalho.

Capítulo 2

Modelos Básicos de Otimização Aplicados à Serviços de Emergência

Este capítulo apresenta um referencial teórico sobre o problema de localização-alocação de instalações, fornecendo uma introdução básica aos aspectos gerais sobre Pesquisa Operacional e Modelagem Matemática. São apresentados os modelos matemáticos que formam a base para o desenvolvimento dos modelos de localização-alocação usados atualmente. Esses modelos foram descritos com o intuito de facilitar o entendimento do modelo que iremos utilizar para localização-alocação de viaturas em múltiplos períodos de tempo, o qual será apresentado no próximo capítulo. Por fim, são apresentados trabalhos relacionados e suas aplicações no contexto desta pesquisa.

2.1 Pesquisa Operacional e Modelagem Matemática

A Pesquisa Operacional é uma abordagem científica que visa apoiar a tomada de decisão utilizando técnicas como modelagem matemática, análise estatística e métodos de otimização [6]. Um modelo matemático é uma representação matemática de uma situação real que pode ser usado para tomar melhores decisões ou simplesmente para entender melhor a situação atual [45].

Modelos matemáticos utilizados para representar a alocação ótima de recursos escassos são conhecidos como modelos de otimização. Um problema básico de otimização é obtido

quando houver a necessidade de maximizar ou minimizar uma função objetivo sujeita a um conjunto de restrições (equações ou inequações) que limitam as variáveis dessa função.

A função objetivo é a expressão matemática que vai delinear o valor ou qualidade da solução que se pretende alcançar, em função dos parâmetros informados e das variáveis de decisão que se busca. Os parâmetros são os valores previamente conhecidos e informados no momento da modelagem matemática do problema, e representam as condições reais do cenário modelado e que irão influenciar de forma direta na execução do modelo. Enquanto que as variáveis de decisão são valores desconhecidos, incógnitas, que só serão esclarecidas e determinadas após a resolução do modelo. A função objetivo determina o tipo de otimização que o modelo está buscando, podendo ser de maximização (lucro, utilidade, nível de serviço, entre outros atributos) ou de minimização (custo, risco, erro, entre outros).

As restrições são conjuntos de expressões matemáticas, de equações e inequações, que são adicionadas ao modelo de forma a considerar as limitações físicas do sistema representado, afetando diretamente os valores das variáveis de decisão, pois irão determinar condições que as variáveis de decisão do modelo devem satisfazer.

Em suma, Otimização utiliza técnicas matemáticas, com o propósito de encontrar valores para as variáveis de decisão, otimizando (maximizando ou minimizando) uma função objetivo para o conjunto de possíveis valores das variáveis, de tal forma que satisfaçam as restrições dadas, visando uma solução ótima [45].

Dentre os modelos de otimização, é possível destacar três classes principais: modelos de programação linear, programação linear inteira e programação não-linear. Modelos de programação linear possuem como principal característica a obrigatoriedade de que a função-objetivo e restrições sejam representadas por funções lineares. Além disso, as variáveis devem pertencer ao conjunto dos números reais. Se as variáveis forem inteiras, o problema será de programação inteira. Caso haja algumas variáveis inteiras e outras reais, tem-se um problema de programação inteira mista. A programação não-linear corresponde aos casos em que pelo menos uma das funções-objetivo e/ou restrições são representadas por funções não-lineares [45].

Os modelos de otimização podem ser classificados como estáticos ou dinâmicos. São considerados modelos estáticos aqueles que representam o estado de um sistema em um determinado momento e suas variáveis de decisão não envolvem sequências de decisões em função

do tempo. Nos modelos dinâmicos o problema inicial pode ser decomposto em subproblemas, possibilitando o tratamento do problema como ocorrências de ordem temporal entre os eventos [45]. Esses modelos são normalmente utilizados para resolver problemas complexos. Alguns dos modelos dinâmicos podem ser facilmente formulados e resolvidos usando programação matemática, enquanto outros precisam de formulações e soluções específicas para cada problema [2].

Os modelos de otimização ainda podem ser classificados como determinísticos ou estocásticos. Modelos determinísticos são aqueles formulados com dados pontuais, ou seja, os parâmetros envolvidos são conhecidos e não são consideradas incertezas e nem variabilidades. Modelos estocásticos são aqueles que envolvem parâmetros incertos, como por exemplo, custo, demanda, produção, entre outros. Problemas reais normalmente tratam com dados aos quais estão associadas incertezas.

Neste trabalho iremos utilizar um modelo determinístico de programação linear inteiramista, com caráter dinâmico, considerando múltiplos períodos de tempo. Apesar do modelo ser determinístico, as incertezas envolvidas nos parâmetros, como a demanda de atendimento às ocorrências, serão tratadas externamente usando a simulação de Monte-Carlo em uma série histórica de demandas.

Modelos de otimização são aplicados nas mais diversas áreas. A seguir, serão expostos, modelos de localização de instalações, os quais são comuns em problemas de alocação de serviços de emergência.

2.2 Modelos de Localização de Instalações

Localizar pontos de atendimento à demanda de serviços e/ou produtos se enquadra em um dos problemas clássicos de otimização. Nesses problemas são disponibilizados pontos candidatos para que sejam escolhidos, dentre eles, aqueles que otimizem o critério de eficiência estabelecido, visando localizar um número limitado de instalações (pontos de atendimento à demanda).

Daskin [14] afirma que os problemas de localização de instalações tratam das decisões de onde devem ser localizadas as instalações, considerando sempre algum critério, no sentido de atender determinado público. Ballou [4] já trabalhava com essa teoria, citando que nos casos

de fábricas, centros de distribuições e varejo, geralmente predominam os fatores econômicos. Revelle [35] destaca que há distinção de objetivos entre os setores públicos e privados. Nos casos que envolvem os serviços públicos (escolas, postos de serviços bancários, hospitais, entre outros) o fator predominante deve ser a acessibilidade aos serviços prestados.

As aplicações para o problema de localização de instalações, em algumas situações, estão voltadas para a importância de instalar os serviços com o foco na cobertura sobre a demanda, com ênfase na redução de custos. Nos casos de serviços de emergência, o foco está na satisfação dos clientes, tais como, a redução da distância até uma unidade hospitalar ou posto de saúde, a localização ideal para instalação de centrais de ambulâncias e/ou estações de bombeiros, assim como a definição de pontos bases para viaturas de patrulhamento policial.

No caso do uso dos recursos da PM, a satisfação dos usuários está relacionada ao atendimento realizado pelas equipes (viaturas) policiais, a disponibilidade do serviço e o cumprimento de metas no sentido de proporcionar uma sensação de segurança à população, que está diretamente relacionada ao posicionamento e ao número de veículos disponíveis. Os estudos sobre a teoria da localização de instalações foram introduzidos por Weber no início do século XX [34]. A teoria desse problema foi relacionada a alocação de serviços de emergência durante a década de 60, quando foi aplicado em estudos que procuravam determinar as melhores localizações para postos policiais em rodovias [25].

Os primeiros trabalhos sobre localização de instalações foram modelados para problemas determinísticos e estáticos. Trabalhos como os de Marianov e ReVelle [27], Owen e Daskin [34], Csahin e Haldun [38], Melo *et. al.* [29] discutiram os modelos básicos de localização de instalações e suas possíveis aplicações.

Modelos Básicos de Localização de Instalações

Serão apresentados os modelos que formam a base para a maioria dos modelos de localização de instalações. São eles: cobertura de conjuntos, máxima cobertura e p-mediana. Apresentamos também o modelo de localização de facilidades, que será utilizado como base nessa pesquisa.

Cobertura de Conjuntos

O primeiro modelo formulado foi proposto para o Problema Cobertura de Conjunto, com o objetivo minimizar o custo com a implantação de uma instalação, ou seja, determinar o número mínimo de instalações de tal forma que cada ponto de demanda seja coberto por pelo menos uma instalação. Para formular este modelo são utilizados os parâmetros e variáveis de decisão conforme descritos a seguir.

Parâmetros do modelo:

- I conjunto de locais i , candidatos à localização de instalações, $i = 1, 2, \dots, m$;
- J conjunto de nós j que representam os clientes, $j = 1, 2, \dots, n$. Cada cliente j pode ser considerado como a população de uma determinada área j ;
- f_i custo de implantar a instalação no local i ;
- S raio de cobertura;
- c_{ij} distância entre o ponto candidato i e o cliente j ;
- N_j subconjunto de locais i que podem atender a demanda do cliente j dentro de uma distância especificada pelo raio de cobertura S ;
- $N_j = \{i \in I \mid c_{ij} \leq S\}; j = 1, 2, \dots, n$.

Variáveis de decisão:

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{se o local } i \text{ é selecionado para implantar a instalação;} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Função objetivo:

$$\min \sum_{i \in I} f_i y_i \tag{2.1}$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{i \in N_j} y_i \geq 1 \quad \forall j \in J; \tag{2.2}$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I. \tag{2.3}$$

A função objetivo (2.1) representa a minimização do custo total de implantação da instalação. As restrições (2.2) indicam que cada cliente j deve ser atendido por pelo menos uma instalação. As restrições (2.3) indicam o tipo das variáveis.

Em alguns casos, quando utiliza-se o modelo de cobertura de conjunto, não existe uma preocupação com o custo de localizar instalações, mas sim em reduzir o número de instalações a serem localizadas [15]. Nesses casos os valores para f_i , referente ao custo de implantar uma instalação, pode ser desprezado, alterando a função objetivo (2.1) que passa a ser formulada como segue (2.4), mantendo-se às restrições sem alterações.

Função objetivo:

$$\min \sum_{i \in I} y_i \quad (2.4)$$

Esse modelo foi utilizado por Toregas *et. al.* [42] com o objetivo de minimizar o número de ambulâncias necessárias para cobrir todos os pontos de demanda, representando regiões do estado de *New York*. Nesse modelo aloca-se às instalações sem preocupar-se com o custo que a instalação irá gerar, e permitindo deixar descoberto outros pontos da demanda, a partir do momento em que uma instalação (ambulância) é alocada para atender uma emergência médica.

O problema de cobertura de conjunto tem como principais pontos negativos o custo elevado para cobrir todos os pontos da demanda, em consequência do alto número de instalações que podem vir a ser necessárias e ao fato do modelo não permitir a distinção entre os pontos que geram muita demanda e aqueles que geram uma procura relativamente escassa [15].

Máxima Cobertura

Motivados a encontrar alternativas aos pontos negativos do modelo para o problema de cobertura de conjunto, Church e ReVelle [10] criaram um modelo para o problema de máxima cobertura. Esse modelo propõe determinar uma quantidade fixa de instalações, uma distância e/ou tempo máximo aceitável entre a demanda e a instalação, e aplicar restrições que priorizem o atendimento aos pontos que geram maior demanda em detrimento aos pontos de demanda escassa. Dessa forma o modelo identificará os locais para implantar a instalação de forma a cobrir o maior número de clientes dentro de um raio estabelecido. Se não houver recursos necessários para atender toda a demanda, serão escolhidos as áreas com maiores demanda para serem atendidas.

Parâmetros do modelo:

- I conjunto de locais i , candidatos à localização de instalação, $i = 1, 2, \dots, m$;
- J conjunto de nós j que representam os clientes, $j = 1, 2, \dots, n$. Cada cliente j pode ser considerado como a população de uma determinada área j ;
- d_j demanda do nó j ;
- P número máximo de instalações que podem ser implantadas;

Para definir a função objetivo ainda é utilizado uma variável de decisão adicional:

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{se a demanda } d_j \text{ for atendida;} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Com a notação adicional, considerando um número máximo de instalações, a função objetivo do problema de máxima cobertura pode ser formulada da forma apresentada a seguir.

Função objetivo:

$$\max \sum_{j \in J} d_j x_j \tag{2.5}$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{i \in N_j} y_i \geq x_j \quad \forall j \in J; \tag{2.6}$$

$$\sum_{i \in I} y_i \leq P \tag{2.7}$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J; \tag{2.8}$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I. \tag{2.9}$$

A função objetivo (2.5) maximiza a demanda coberta. As restrições (2.6) garantem que a demanda do nó j será coberta se houver ao menos uma instalação implantada capaz de atender esta demanda. A restrição (2.7) indica que o número de instalações implantadas não ultrapassa o limite disponível. As restrições (2.8) e (2.9) indicam o tipo de variáveis.

P-Mediana

A formulação para o Problema da P-Mediana apresentada por Hakimi [25] define o modelo como um grafo não orientado, composto por um conjunto mínimo de vértices P (mediana) e um conjunto de arestas, de forma que a sua aplicação minimize a soma de todas as distâncias entre cada vértice até um determinado ponto mais próximo das arestas. O modelo consiste em identificar os locais adequados para implantar P instalações de forma a minimizar a soma das distâncias totais entre a demanda e as instalações dos serviços/fábrica.

As características mais relevantes do modelo das P-medianas são: o conhecimento sobre os números da demanda, a sugestão de uma quantidade P finita de instalações a serem localizadas, a informação sobre a distância entre cada ponto da demanda e os locais candidatos à instalações.

Parâmetros do modelo:

- I conjunto de locais i , candidatos à localização de instalações, $i = 1, 2, \dots, m$;
- J conjunto de nós j que representam os clientes, $j = 1, 2, \dots, n$. Cada cliente j pode ser considerado como a população de uma determinada área j ;
- P número máximo de instalações que podem ser implantadas;
- c_{ij} custo para atender a demanda dos clientes j a partir de uma instalação localizada em i . O custo pode ser medido pela distância ou tempo de deslocamento entre i e j ;

Variáveis de decisão:

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{se o local } i \text{ é selecionado para implantar uma instalação;} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Variável adicional:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se a instalação localizada em } i \text{ atender a demanda total do cliente } j; \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Função objetivo:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \tag{2.10}$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J; \quad (2.11)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad \forall i \in I, \forall j \in J; \quad (2.12)$$

$$\sum_{i \in I} y_i = P; \quad (2.13)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J; \quad (2.14)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I. \quad (2.15)$$

A função objetivo (2.10) minimiza o custo total de designação de clientes as instalações. As restrições (2.11) garantem que cada cliente j será atendido por uma única instalação. As restrições (2.12) estabelecem que o cliente j deve ser atendido por uma instalação já implantada no local i . A restrição (2.13) assegura que as instalações implantadas não ultrapassam o limite estabelecido e as restrições (2.14) e (2.15) representam o tipo de variáveis.

O problema p-mediana também pode ser apresentado [6] considerando custos ponderados pela demanda dos clientes. Neste caso, a função objetivo (2.10) é substituída por:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_j c_{ij} x_{ij} \quad (2.16)$$

em que d_j representa a demanda do cliente j .

Os modelos de localização podem receber pequenas alterações na formulação, com o objetivo de limitar o número de demandas que cada instalação pode atender. Essas modificações podem ocorrer através da inclusão de nova restrição ou pela alteração de alguma das restrições já formuladas, no sentido de determinar que a soma das demandas atendidas por cada instalação não exceda a capacidade estabelecida.

P-Mediana capacitada

A cada instalação implantada no local i é associada uma capacidade q_i de atendimento à demanda. Neste caso as restrições (2.12) do problema p-mediana são alteradas para

$$\sum_{j \in J} d_j x_{ij} \leq q_i y_i \quad \forall i \in I; \quad (2.17)$$

Daskin [15] resume os conceitos sobre os modelos aqui expostos da seguinte forma: o modelo cobertura de conjunto encontra o número mínimo (ou custo) de instalações necessárias para cobrir todas as demandas dentro de um determinado tempo ou distância. O modelo de máxima cobertura relaxa a condição de que os pontos de demanda devem ser servidos em sua totalidade e passa a maximizar o número de demandas cobertas usando um número fixo de instalações e por último com o modelo p-mediana capacitada é desconsiderada a obrigatoriedade da cobertura e passa a ser priorizada a redução da distância total ponderada entre os nós de demanda e as instalações mais próximas.

Localização de Facilidades

O problema de localização de facilidades envolve as decisões em designar a localização de instalações e a designação dos clientes a estas, de forma a minimizar os custos de instalação e custos variáveis de atendimento das demandas [3, 6]. Quando a demanda de um cliente j puder ser atendida por mais de uma instalação, as variáveis x_{ij} tornam-se contínuas e são representadas por

x_{ij} fração da demanda do cliente j atendido pela instalação implantada em i

Função objetivo:

$$\min \sum_{i \in I} f_i y_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \quad (2.18)$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in J; \quad (2.19)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad \forall i \in I, \forall j \in J; \quad (2.20)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I; \quad (2.21)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J. \quad (2.22)$$

A função objetivo minimiza a soma dos custos para abrir novas instalações e dos custos de transportes das localidades até os pontos de demanda. As restrições (2.19) garantem que cada cliente j será atendido por uma única instalação. As restrições (2.20) estabelecem que o

cliente j deve ser atendido por uma instalação já implantada no local i e as restrições (2.21) representam o tipo de variáveis. As restrições (2.22) garantem que a fração estabelecida sobre a demanda está entre 0 e 1.

Os problemas de alocação-localização estão relacionadas à características e situações de incertezas que geram dificuldades para solução do problema. Essas características levam em conta fatores dinâmicos que inevitavelmente aumentarão a complexidade do modelo. Algumas dessas características, tais como as variações nas demandas dos clientes e nos custos de transporte [44] podem sofrer alterações em função do tempo. Dependendo do horizonte de planejamento em que as decisões de alocação-localização devem ser feitas, os problemas de localização de instalações podem ser categorizados como período único ou multi-período. No problema de alocação-localização com único período, os parâmetros do modelo são únicos, enquanto que no dinâmico, a visão do mundo real em múltiplos períodos de tempo, pode fazer com que os valores dos parâmetros sejam diferentes [39] para cada horizonte de planejamento.

Na década de 80, Gunawardane [23] introduziu conceitos dinâmicos no problema de máxima cobertura. O trabalho considerou a instalação e o possível deslocamento de um serviço entre os pontos candidatos, dentro de horizontes de tempo. O problema foi tratado através de uma extensão na definição do modelo, incluindo um sobrescrito t na notação dos parâmetros, para representar os períodos de tempo inseridos em conjunto de horizontes $t \in T$.

Ao longo dos anos, as características dinâmicas dos problemas passaram a ser consideradas e novas formulações dinâmicas e estocásticas foram sendo introduzidas na evolução das soluções. Neste trabalho vamos considerar que as demandas e o número de viaturas policiais disponíveis podem variar em cada horizonte de planejamento. O problema será formulado matematicamente como um modelo de localização de instalações dinâmico, que considera variações dos parâmetros em diferentes períodos de tempo. O modelo será descrito no próximo capítulo.

2.3 Trabalhos Relacionados

Em um trabalho de análise comparativa, Ferrari [22] afirma que modelos com características determinísticas continuam sendo utilizados amplamente, mas aponta que novos modelos passaram a surgir, incorporando características dinâmicas e estocásticas, afim de considerar aspectos de incertezas que influenciam na direção de bons resultados.

Alguns fatores que envolvem problemas de localização, influenciam para que esse tipo de problema possa ser tratado como de natureza estocástica. A variação da demanda, os locais de instalações dos clientes e dos fornecedores, a variação na distância entre a instalação do serviço/fábrica e a demanda, e a falta de controle sob essas alterações são os principais fatores que podem ser levados em consideração. Apontamos a seguir estudos realizados na área de localização de instalações, considerando as mais diversas características, sendo elas determinísticas ou estocásticas.

Em estudo realizado no município de Curitiba-PR, foi avaliado o impacto da instalação de novas unidades escolares e a variação no número de viaturas de patrulhamento escolar, caracterizando uma variação dos cenários no decorrer dos horizontes de tempo [37]. Nessa pesquisa os resultados obtidos na aplicação do modelo p-mediana foram comparados aos resultados da estratégia utilizada pelo comando policial para realizar a distribuição das viaturas do Batalhão de Patrulha Escolar Comunitária. O modelo proposto obteve como resultado a redução da distância média percorrida e uma melhor distribuição das viaturas, de forma que uma viatura não interfira na atuação das demais. Apesar da melhoria imediata, foi considerado que a utilização do modelo poderia apresentar melhores resultados, caso tivesse sido consideradas algumas variações nos dados, tais como: o aumento no número de colégios, uma possível redução no número de viaturas.

Adler [1] utiliza os conceitos de programação linear inteira para formular quatro estudos de caso para alocação-localização de viaturas policiais de patrulhamento de trânsito nas estradas no norte de Israel. Na primeira fase, a função objetivo é formulada com três objetivos distintos, maximizar a presença e visibilidade da polícia de trânsito, maximizar a presença policial nos pontos em que ocorrem frequentes infrações de trânsito, e maximizar o tempo disponível para o trabalho pró-ativo. Na segunda formulação é utilizada uma abordagem para a localização e distribuição da probabilidade de chamadas por serviço, produzindo uma agenda diária detalhada de deslocamento através do horizonte de planejamento. A

terceira formulação altera a cobertura dos requisitos de tal modo que determinados trechos de estradas podem ser atendidos de forma mais rápida, tratando os problemas de congestionamento e seus efeitos subsequente no número de acidentes. A quarta formulação maximiza a presença e perceptibilidade das viaturas nos locais para os quais foram alocadas para o atendimento a demanda em cada turno e considerando os efeitos de cobertura identificados na literatura.

A definição de uma distribuição eficiente na localização-alocação de equipes de patrulha policial foi abordada por Curtin [12], tomando como base a geografia já utilizada pelo distrito de polícia de Dallas, cidade do Texas. Ele empregou um método com uma formulação de máxima cobertura tradicional e uma formulação de cobertura de *backup*. Neste método todas as demandas estão relacionadas a pelo menos duas instalações, de forma a garantir o atendimento através da alocação de uma segunda instalação, quando a primeira que foi alocada estiver ocupada no atendimento a outra demanda. Nessa pesquisa é incentivada a integração de SIG como forma de auxílio na busca por resultados que melhor atendam os objetivos determinados. As soluções foram comparadas com a estratégias antes utilizadas pela polícia, e mostrou melhora substancial no número de incidentes cobertos e na distância total percorrida.

Gurgel [24] destaca a importância de alocar unidades policiais em localizações estratégicas para a gestão das operações policiais, considerando como pontos primordiais a redução dos custos de operações e os tempos de resposta para ocorrências policiais. Foram analisados três modelos matemáticos, tomando como base o modelo p-mediana combinado ao problema do caixeiro viajante, com o objetivo de atender regiões que ainda não possuem pontos de apoio instalados. Os modelos foram aplicados aos dados de ocorrências do Comando de Policiamento da Capital que é responsável pelo município de Natal-RN. Em 2010, a cidade possuía 31 unidades policiais para 36 bairros e destes, 19 possuíam algum auxílio policial, cenário que foi considerado como base para os experimentos. Os resultados da aplicação proposta demonstraram ser possível a redução no tempo de resposta ao atendimento de emergências, melhoria do nível de serviço comprovado pelo aumento de casos resolvidos e redução dos deslocamentos das equipes policiais.

Além do auxílio de SIG, outras abordagens foram integradas aos modelos de localização de instalações. Silva [40] utilizou três estratégias para eleger os locais candidatos ao posicionamento de viaturas policiais, a primeira baseada na decisão do gestor de patrulha-

mento policial, a segunda baseada no modelo P-medianas e a terceira utilizando o método de clusterização *k-means*¹. Com o apoio de um SIG, georreferenciou as ocorrências de crimes na cidade de João Pessoa-PB. Além das estratégias já citadas, foram utilizados métodos de solução para a alocação de viaturas, com abordagens exatas e heurísticas. Os resultados obtidos apontam para soluções iguais ou muito próximas da solução ótima. Esse trabalho ainda apresentou como resultado uma ferramenta WEB de apoio a decisão espacial baseado na solução da formulação do problema de localização de instalações com restrições de cobertura e cobertura *backup*.

Preocupado com o aumento repentino da demanda de sangue logo após a ocorrência de terremotos, Sha [39] propôs um modelo para agendamento no abastecimento de bancos de sangue como forma de auxiliar nos casos de emergência na cidade de Pequim. Foi utilizado um modelo de localização-alocação em vários períodos, integrado a uma heurística baseada no relaxamento Lagrangeano. Nesse mesmo contexto de problemas de localização-alocação de instalações em multi-períodos, Vatsa [44] modelou uma solução para o problema, considerando a incerteza no número de médicos disponíveis para cada período (turno) de atendimento nas instalações (postos de atendimento e primeiros socorros). Usou uma abordagem *minmax*, integrada à técnicas de solução de busca local e busca tabu, comparando os resultados com soluções ótimas, obtidas com a utilização de solucionadores comerciais. A conclusão indica que um dos algoritmos de busca tabu foi mais rápido e produziu soluções ótimas.

O trabalho em tela apresenta uma ferramenta aos gestores do serviço de patrulhamento policial, como proposta de solução ao serviço de localização-alocação de viaturas policiais, que possibilita a esses gestores a previsibilidade de cenários, através da alteração dos parâmetros. Esta ferramenta utiliza um modelo determinístico dinâmico, modelado em múltiplos períodos de planejamento, considerando a variação no número de ocorrências em cada janela de tempo e ainda a incerteza na definição desse número de ocorrências. Para isso, foi incorporado a utilização da técnica de simulação de Monte Carlo aplicada em uma série histórica dos registros de ocorrências.

¹Algoritmo de análise de agrupamentos baseado em protótipos que são definidos em termos de um centróide, que geralmente é calculado através da média de um conjunto de pontos [41]

Capítulo 3

Uma proposta para solução do problema de localização-alocação de viaturas em centros urbanos

Neste capítulo apresentamos a proposta para o desenvolvimento de uma ferramenta que possa auxiliar no processo de localização-alocação de viaturas em centros urbanos. Será utilizado um modelo de localização-alocação de instalações em múltiplos períodos. Esse modelo procura soluções no sentido de alocar os recursos policiais disponíveis, de maneira que busque a minimização dos custos operacionais totais, relacionados ao deslocamento das viaturas até os pontos de ocorrências, em um determinado horizonte de tempo.

Sua formulação matemática está descrita na Seção 3.1. O modelo se enquadra na classe de problemas de programação inteira-mista determinístico. Para tratar a incerteza no número de ocorrências será utilizado a simulação de Monte Carlo (descrito na Seção 3.2). Tal simulação será tratada externamente ao modelo.

O software AIMMS (Seção 3.3) será utilizado para modelagem do problema e também para o desenvolvimento da interface gráfica. Os mapas dos centros urbanos, utilizados para plotar os pontos de ocorrências e de alocação das viaturas, serão inseridos utilizando SIG (Seção 3.4). Por fim, são apresentadas algumas telas construídas na ferramenta.

3.1 Modelagem Matemática

Nos modelos de localização de instalações em geral, são fornecidas algumas informações consideradas como dados de partida para execução dos modelos. Em geral os problemas de localização-alocação de instalações fornecem como entrada para o modelo um conjunto I de pontos candidatos à instalações que irão satisfazer/atender um conjunto de ocorrências J . Nesse modelo, as instalações representam as viaturas, e busca-se uma solução para alocação destas às demandas, aqui representadas pelo conjunto de ocorrência.

O problema de localização dinâmica é planejado para definir soluções em função de horizontes de tempo. Essa configuração em multi-períodos é dada pelo planejamento de horizontes divididos em períodos de tempos que representam turnos de atuação das viaturas. Considerando a hipótese de modelagem em multi-períodos, o problema passa a variar em função de T , que representa um conjunto de cortes no horizonte de tempo (turnos de prestação de serviços), indexados por $t \in T$.

No modelo proposto neste trabalho, o custo para alocar uma viatura está relacionado diretamente à distância entre os prováveis pontos para alocação $i \in I$ e os pontos de ocorrências policiais $j \in J$. Esse parâmetro pode ser representado por uma matriz como apresentado a seguir:

c_{ij}^t = custo para instalar uma viatura no ponto i de forma a atender uma ocorrência no ponto j em cada horizonte de tempo t .

Tomando como base que o número de ocorrências não é constante e nem sazonal, ou seja, não ocorre no mesmo instante de tempo e nem em períodos pré-determinados, ela pode ser modelada em função do tempo e representada pelo parâmetro:

d_j^t = ocorrência do ponto j no horizonte de tempo t .

A partir das considerações relacionadas aos cortes no horizonte de tempo, todos os demais parâmetros e variáveis do modelo passam a ser modelados em função de $t \in T$. A representação que segue denota o número máximo de viaturas a serem localizadas em cada horizonte de execução do modelo, sendo:

p^t = número máximo de viaturas que podem operar no horizonte de tempo t .

Uma característica importante no modelo de medianas capacitadas é informar o limite

de operação de cada viatura em um horizonte de execução. No modelo proposto a capacidade de cada viatura é representada pelo parâmetro:

$$q_i^t = \text{capacidade da viatura } i \text{ operando no horizonte de tempo } t.$$

Para cada horizonte de tempo, a localização das viaturas podem mudar devido as alterações nos locais de ocorrências. A variável de decisão, que apresenta as medianas alocadas na solução do problema em cada horizonte de tempo t , é definida como:

$$y_i^t = \begin{cases} 1 & \text{se a viatura } i \text{ está operando no horizonte de tempo } t \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Para representar qual viatura é atribuída para atender um determinada ocorrência, as variáveis de decisão são representadas como se segue:

$$x_{ij}^t = \begin{cases} 1 & \text{se a viatura } i \text{ for alocada para a ocorrência } j \text{ no horizonte de tempo } t \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

A função objetivo pode ser definida por:

$$\min \sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in I} f_i^t * y_i^t + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}^t * x_{ij}^t \right) \quad (3.1)$$

A primeira expressão na soma está associada ao custo de implantação de uma viatura i durante o horizonte de planejamento f_i^t . Este valor será considerado nulo, pois neste modelo iremos admitir que não há custo para instalação. Resultando em:

$$\min \sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}^t * x_{ij}^t \right) \quad (3.2)$$

O objetivo será minimizar o custo de deslocamento entre os pontos de instalação das viaturas até os pontos de ocorrências policiais, sujeito às restrições:

$$\sum_{i \in I} x_{ij}^t = d_j^t \quad \forall j \in J, t \in T; \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij}^t \leq q_i^t * y_i^t \quad \forall i \in I, t \in T; \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in I} y_i^t \leq p^t \quad \forall t \in T; \quad (3.5)$$

$$y_i^t \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, t \in T; \quad (3.6)$$

$$x_{ij}^t \in \mathbb{Z} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T. \quad (3.7)$$

As restrições (3.3) foram formuladas para garantir que cada ponto de ocorrência j terá uma viatura i alocada no horizonte t do planejamento.

As restrições (3.4) correspondem aos limites de capacidade de operação de cada viatura, e garantem que todo ponto de ocorrência j terá uma viatura alocada, obedecendo a capacidade de operação de cada viatura i em um horizonte t , registrando que viatura estará alocada para uma determinada ocorrência j em um horizonte t .

As restrições (3.5) garantem que o número de ocorrências a serem alocadas será menor ou igual ao número de viaturas operantes em um horizonte t de planejamento.

As restrições (3.6) e (3.7) limitam, respectivamente, as variáveis de decisão que definem as capacidades de operar, e a relação viaturas por ocorrência, a conjuntos de valores binários e inteiros.

A formulação do modelo apresentado acima, segue características do modelo p-Mediana proposto por Hakimi [25]. Nesse modelo a função objetivo propõe os melhores pontos para alocação de um número p de instalações de forma a minimizar o valor do somatório da distância entre as demandas e as instalações e o custo de localizar uma instalação. O modelo como está aqui apresentado, remete ao modelo de localização com restrição de capacidade aplicado em múltiplos períodos [8], nos quais são determinadas limitações de atendimento para cada viatura alocada. Além da restrição de capacidade, a demanda é determinada em função dos horizontes de tempo. A alocação das instalações está sujeita às restrições como a distância total ponderada entre os pontos candidatos à localização-alocação de viaturas e os pontos de ocorrências; e a determinação de um número máximo de viaturas a serem alocadas.

3.2 Previsão de demanda

A simulação é uma técnica que envolve o uso de um modelo que visa imitar ou replicar o comportamento de sistemas do mundo real, procurando se aproximar o máximo possível do problema em estudo. Se o modelo tem um elemento estocástico, temos então o conceito de simulação estocástica [36].

A simulação estocástica visa imitar ou replicar o comportamento de sistemas comple-

xos explorando a sua aleatoriedade para obter cenários das possíveis saídas desses sistemas. Devido a aleatoriedade envolvida, os métodos de simulação são também conhecidos como métodos de Monte Carlo [36]. O método recebeu esse nome proveniente da roleta do Cassino localizado no principado de Mônaco, e ganhou notoriedade durante a Segunda Guerra Mundial, nos experimentos de John Von Neumann e Stanislaw Ulam [33].

Os modelos de simulação são caracterizados quanto a determinísticos e probabilísticos. Os determinísticos compreendem aqueles em que para um conjunto de dados fornecido, obtêm-se uma saída única, precisa e exata. Já o segundo são aqueles que incorporam comportamentos probabilístico das variáveis do sistema [26]. Nesses casos, o método de Monte Carlo se aplica devido sua capacidade de tratar problemas de natureza incerta, observando a aleatoriedade dos números no problema original, focando na simulação do comportamento ao acaso de variáveis probabilísticas, induzindo na geração de valores para as variáveis, com o auxílio de números aleatórios [31].

O método de Monte Carlo foi utilizado neste trabalho para simulação e previsão dos números de ocorrências policiais, em virtude da natureza de incerteza deste cenário, além da capacidade deste método trabalhar a aleatoriedade e o comportamento do acaso com variáveis probabilísticas. Os detalhes de aplicação do método de previsão no número de ocorrências estão descritos nos cenários de estudo de caso (Capítulo 4)

3.3 Advanced Interactive Multidimensional Modeling System (AIMMS)

O AIMMS é um software de modelagem matemática, que apresenta uma combinação integrada entre linguagem de modelagem e interface gráfica. O AIMMS permite a criação de uma interface gráfica, nos moldes de aplicações *stand-alone*, assim como o desenvolvimento de componentes de otimização.

O software tem sido utilizado por desenvolvedores de aplicativos e especialistas em pesquisa, na construção de modelos de otimização complexos e de grande escala. Além disso, o AIMMS possui distribuição direcionada a estudantes e universidades de todo o mundo, facilitando o uso em cursos de Pesquisa Operacional e Otimização, bem como para projetos de pesquisa e de graduação.

O software inclui pacotes de otimização (CPLEX, XPRESS, KNITRO, XA) para resolver as principais classes de problemas de otimização, como: problemas de programação linear, inteira mista, e programação não-linear.

Nos casos de grande complexidade, é permitido ainda incorporar outros *solvers* comerciais, disponíveis no mercado ou desenvolvidos para solução de problemas específicos. Além disso, permite a inclusão de conceitos de programação estocástica e otimização robusta para trabalhos com incerteza nos dados dos modelos [13].

O modelo proposto se enquadra na classe de problemas de programação inteira mista e foi solucionado no AIMMS com o *solver* CPLEX versão 12.6.2. O CPLEX¹ é um *solver* que pertence à IBM e resolve problemas de programação inteira, problemas grandes de programação linear, problemas de programação quadrática convexos e não-convexos e problemas de programação inteira mista. Para solução de problemas de programação inteira mista, o CPLEX disponibiliza o algoritmo de busca dinâmica *Branch-and-Cut*, que foi utilizado para escolha dos nós durante a aplicação dos modelos.

3.4 Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

Os SIGs são definidos como um conjunto de recursos computacionais, pessoas qualificadas e dados geográficos. Os SIGs são organizados com o objetivo de gerenciar banco de dados, efetuando operações de inserção, manipulação, remoção, recuperação, atualização, análise e visualização de dados geográficos, funcionando como uma valiosa ferramenta em estudos de planejamento e gerenciamento [11, 21].

Os SIGs tem se tornado ferramenta importante no auxílio ao geoprocessamento de imagens, propiciando funções como a geração de mapas temáticos, permitindo a conexão com informações espaciais, o uso de informações de banco de dados públicos, sobreposição de *layers* (camadas de informação) [9].

O *Quantum GIS* - QGIS é um SIG de Código Aberto, com permissão para inspecionar e modificar o código-fonte sobre os termos da *General Public License* (GPL). QGIS oferece muitas funcionalidades SIG comuns fornecidas como funções do núcleo da ferramenta ou como complementos. O QGIS permite a integração de complementos externos, desenvolvidos

¹<https://www.ibm.com/us-en/marketplace/ibm-ilog-cplex>

em Python, que são fornecidos pela comunidade de desenvolvedores [7].

O QGIS traz outras cinco categorias gerais de funções e complementos. A visualização de dados, exploração de dados geográficos (criar, editar, gerir e exportar), compositor de mapas, análise de dados, publicação de mapas na internet. Um dos complementos existentes para o QGIS é o módulo *Python fTools* que fornece recursos únicos para várias tarefas SIG comuns aos dados vetoriais, sem a necessidade de software adicional, bibliotecas, ou trabalho complexo. Fornece um conjunto de formas de gestão de dados espaciais e funções de análise [32].

Diante das características identificadas no QGIS e descritas nesta subseção, essa ferramenta foi utilizada para geração de pontos aleatórios candidatos à alocação de viaturas, assim como para geração de pontos, também aleatórios, para representar os locais de ocorrências policiais. A utilização do QGIS evidenciou-se útil, por propiciar, além da funcionalidade já descrita, a utilização e produção de mapas geográficos, que representam as cidades cenários dos estudos de caso.

3.5 Aplicação

Além do modelo de localização-alocação de instalações multi-período que estamos utilizando para modelagem do problema, implementamos também na ferramenta os modelos básicos de máxima cobertura e p-mediana capacitado. Tais modelos adicionam a ferramenta a possibilidade de gerar cenários distintos, como o de cobertura de demanda e a identificação de locais adequados para alocação das viaturas, buscando a minimização das distâncias até os pontos de ocorrências.

O software AIMMS permite criar seções para organização dos modelos matemáticos e elementos que irão compor as telas da ferramenta proposta. Foram criadas seções, conforme destaque na Figura 3.1, para cada modelo matemático. As seções *Allocation MultiPeriod Location*, *Maximal Covering Location* e *Capacited pMedian Location* são as responsáveis por manter organizados os parâmetros, variáveis de decisão e restrições dos modelos utilizados nesse trabalho.

Além das seções criadas para organizar os modelos matemáticos, foram criadas ainda: a *Location Section* com o objetivo de facilitar a organização dos parâmetros relacionados às

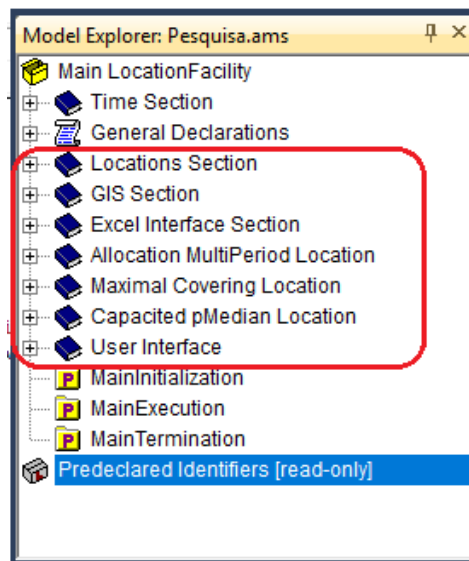


Figura 3.1: Tela de gerenciamento das seções no AIMMS.

informações geográficas dos pontos que representam os locais de ocorrências e dos candidatos à alocação de viaturas; a *GIS Section* organiza os parâmetros que gerenciam a visualização dos pontos no mapa exibido na aplicação, apresentado na Figura 3.2; a *Excel Interface Section* contém os procedimentos de importação da base de dados contendo informações armazenadas no *Microsoft Excel* e a *User Interface* para gestão das interfaces gráficas da aplicação.

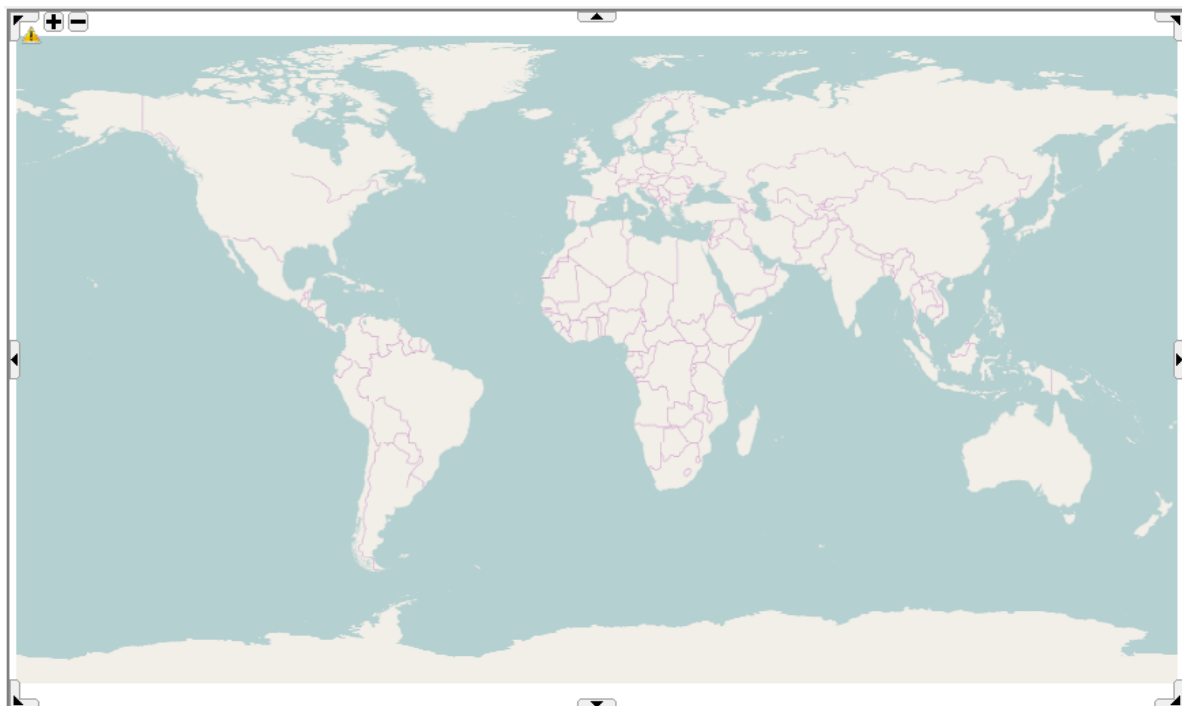


Figura 3.2: Tela de visualização do mapa no AIMMS.

A utilização das seções relacionadas a cada modelo possibilitou a organização e declaração dos conjuntos (índices), parâmetros, variáveis, restrições e outros tipos de identificadores (Figura 3.3(a)). Na Figura 3.3(b) é possível visualizar a tela da matriz de distâncias.

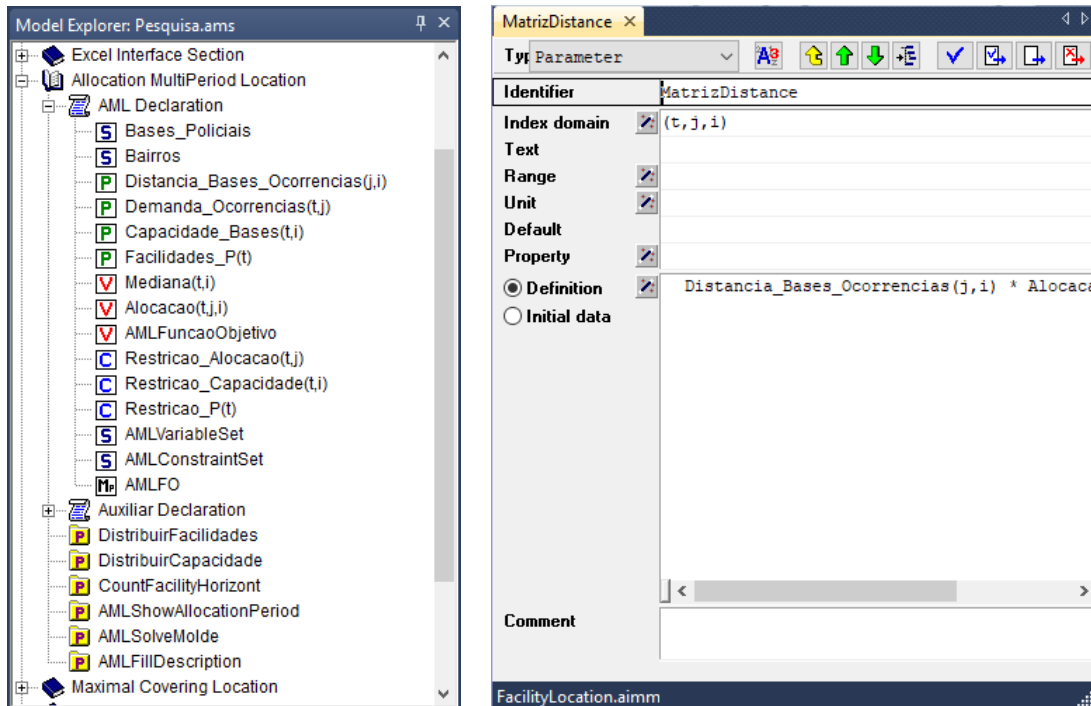


Figura 3.3: Tela de visualização e criação de parâmetros e variáveis no AIMMS.

A importação de dados é realizada através da utilização de um algoritmo desenvolvido no AIMMS, implementado em uma *procedures*, conforme apresentado na Figura 3.4.

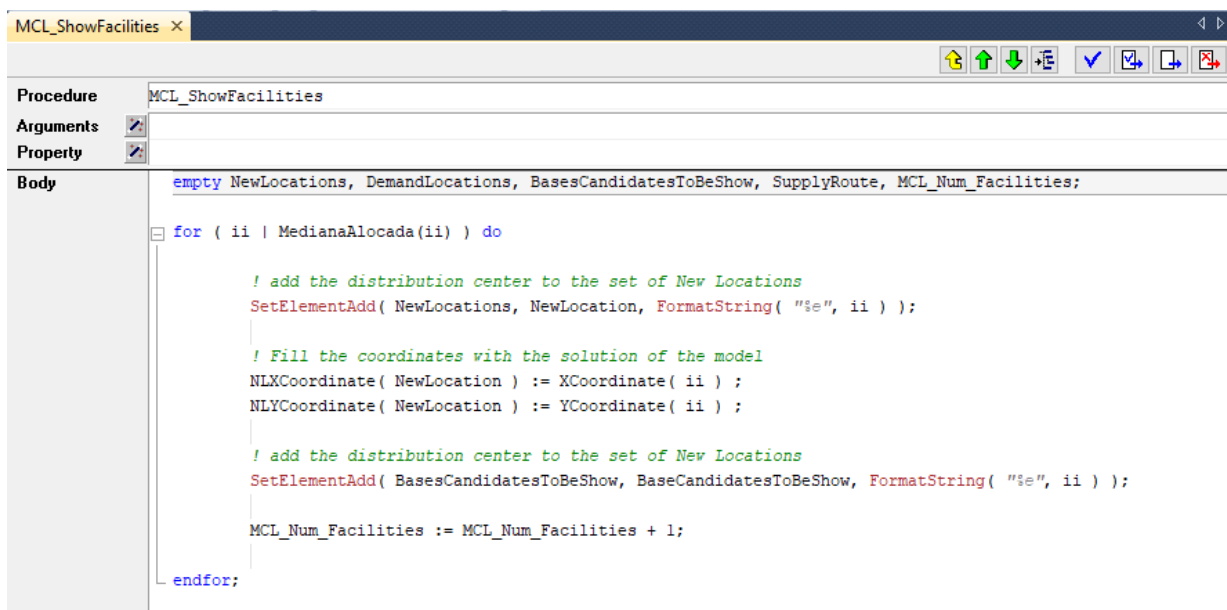


Figura 3.4: Tela de criação de *procedures* no AIMMS.

Além de possibilitar a importação de dados, o AIMMS possui sua própria estrutura de tabelas e permite também a visualização dos dados. Na Figura 3.5, é possível visualizar dados da matriz de distâncias entre as localidades selecionadas como pontos candidatos à instalação de base policiais e os pontos de ocorrências policiais.

	F01	F02	F03	F04	F05	F06	F07	F08	F09	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	F24	F25	F26
B01	1612	1437	1022	182	1407	2441	2275	3024	3539	4154	3795	3720	2040	1295	1216	1232	1292	911	603	188	527	1929	1061	1454	1395	1984
B02	5630	5484	4612	3969	2771	1750	5248	5512	4872	4385	4584	5735	5312	4977	5275	5208	5403	5025	4675	4254	3629	6042	3245	2729	2777	2130
B03	3103	1987	1389	2321	2755	3532	181	659	1695	2759	2202	1421	570	1279	2001	3001	2547	2315	2083	2484	2369	2763	2308	2774	3261	3426
B04	1357	212	919	1555	2678	3711	1601	2400	3404	4340	3840	3179	1218	645	327	1362	822	770	870	1421	1852	1007	2210	2720	2838	3345
B05	3921	3636	2734	2168	930	131	3420	3785	3419	3323	3302	4141	3452	3098	3434	3514	3620	3225	2851	2493	1815	4248	1377	884	1209	527
B06	679	841	1849	2075	3313	4355	2616	3396	4439	5366	4873	4174	2228	1657	935	1006	629	1017	1407	1778	2427	45	2906	3359	3279	3902
B07	1831	775	437	1362	2301	3297	1120	1934	2840	3750	3258	2702	780	70	734	1722	1275	1038	871	1377	1575	1592	1812	2338	2582	2993
B08	3382	3228	2432	1698	587	691	3318	3805	3656	3736	3631	4265	3278	2798	3015	2965	3131	2752	2408	1983	1365	3770	1072	562	583	143
B09	3371	2251	1644	2555	2908	3631	440	399	1480	2579	2009	1153	827	1547	2268	3269	2815	2583	2345	2733	2582	3021	2479	2924	3442	3564
B10	4140	3104	2246	2914	2798	3235	1418	1017	512	1515	958	1034	1783	2306	3064	3954	3591	3281	2954	3192	2808	3913	2498	2797	3435	3336
B11	4678	3630	2786	3439	3232	3551	1896	1325	32	1148	566	974	2275	2839	3598	4494	4127	3822	3495	3725	3316	4435	2973	3226	3884	3718
B12	508	745	1687	1840	3080	4120	2555	3351	4342	5237	4758	4130	2171	1535	784	776	389	789	1190	1535	2193	272	2682	3126	3033	3661
B13	1607	1763	1510	585	1490	2449	2767	3516	3990	4542	4215	4206	2524	1763	1545	1185	1452	1150	983	433	766	2086	1290	1536	1246	1929
B14	361	866	1762	1834	3073	4108	2676	3477	4446	5324	4853	4256	2295	1635	877	667	402	807	1216	1512	2188	376	2691	3120	2994	3637
B15	356	927	1834	1902	3141	4174	2738	3537	4514	5395	4923	4316	2355	1703	946	701	475	879	1288	1576	2256	365	2761	3188	3054	3700
B16	4101	3862	2979	2372	1146	134	3683	4044	3649	3499	3509	4389	3712	3345	3657	3687	3821	3431	3066	2683	2023	4454	1613	1103	1315	601
B17	4528	3392	2817	3689	3842	4379	1602	788	1127	2213	1658	144	1968	2723	3429	4444	3976	3758	3522	3894	3672	4127	3475	3848	4441	4433
B18	1092	415	838	1139	2335	3380	1877	2690	3559	4404	3944	3460	1524	764	194	967	545	298	425	949	1468	1037	1897	2380	2416	2971
B19	3831	2722	2046	2894	3076	3686	915	304	1039	2174	1593	735	1303	1992	2729	3711	3275	3024	2760	3108	2874	3498	2691	3085	3659	3692
B20	4502	3413	2659	3414	3371	3803	1619	939	454	1589	1013	537	2008	2655	3405	4356	3947	3672	3378	3669	3336	4200	3056	3371	4002	3913
B21	530	923	1447	1265	2493	3518	2568	3381	4204	4990	4558	4148	2217	1449	784	275	359	415	765	920	1616	946	2141	2540	2383	3034
B22	1357	212	919	1555	2678	3711	1601	2400	3404	4340	3840	3179	1218	645	327	1362	822	770	870	1421	1852	1007	2210	2720	2838	3345

Figura 3.5: Tela de visualização de dados no AIMMS.

Os valores dos parâmetros de entrada para execução dos modelos, podem ser informados através da digitação na tela de edição do identificador, ou através de campos disponibilizados em interface gráfica (Figura 3.6), produzida no próprio AIMMS. Essas opções também são válidas para visualização dos resultados da execução dos modelos, registrados na variáveis de decisão (Figuras 3.7).

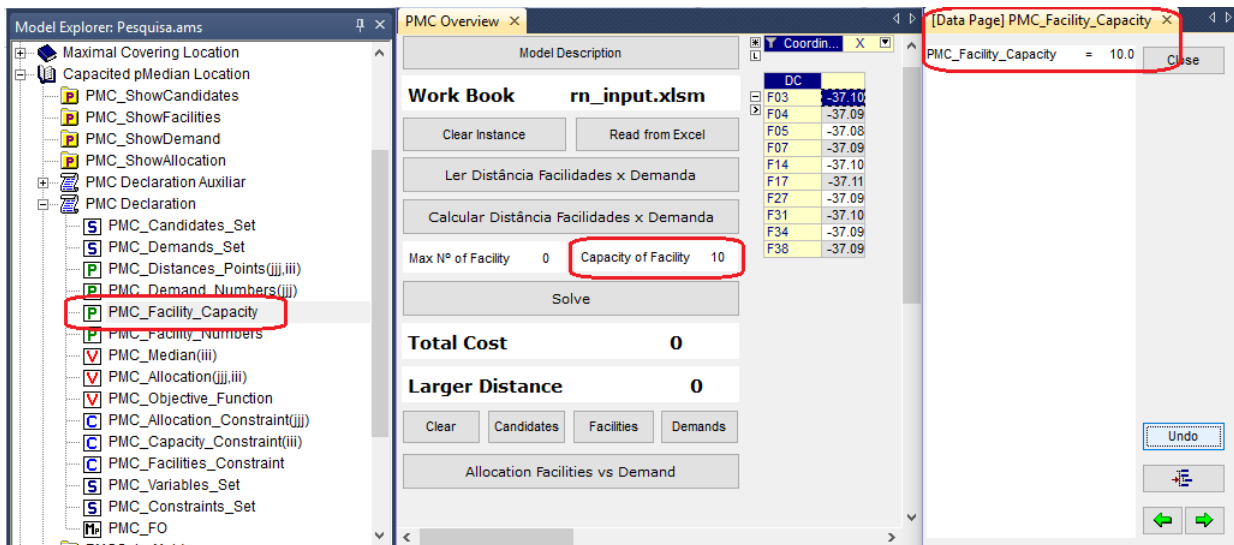


Figura 3.6: Visualização dos valores dos parâmetros no AIMMS.

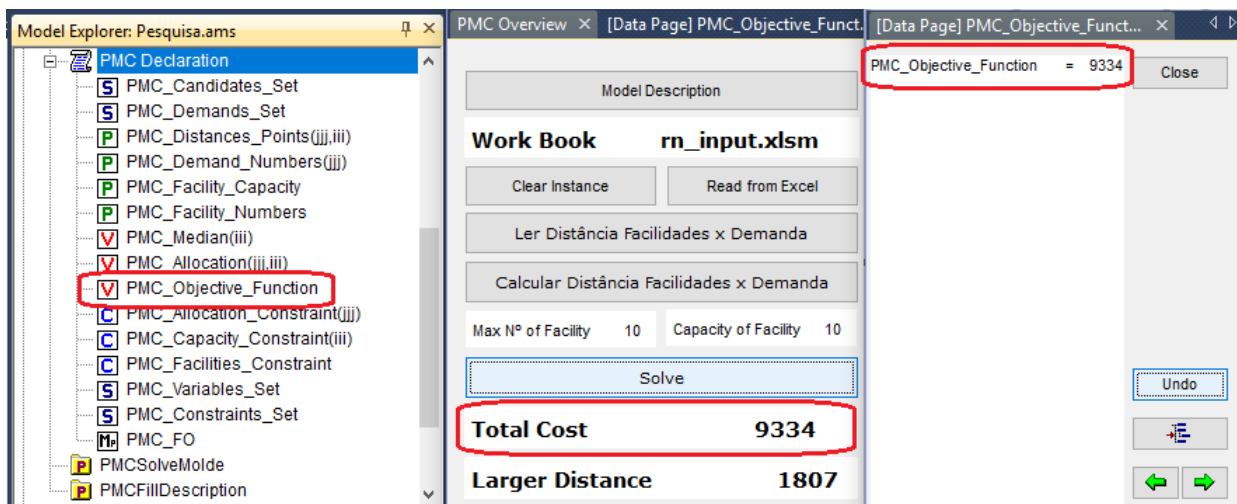


Figura 3.7: Visualização dos valores das variáveis no AIMMS.

A funcionalidade ofertada pelo AIMMS de possibilitar a construção de uma interface gráfica que agrupe componentes visuais (botões, campos de texto, tabelas, mapas) para representação dos identificadores do modelo, propicia uma fácil utilização por usuários sem conhecimentos avançados em otimização matemática. Nas Figuras 3.8, 3.9 e 3.10 apresentamos as interfaces gráficas construídas para aplicação deste trabalho.

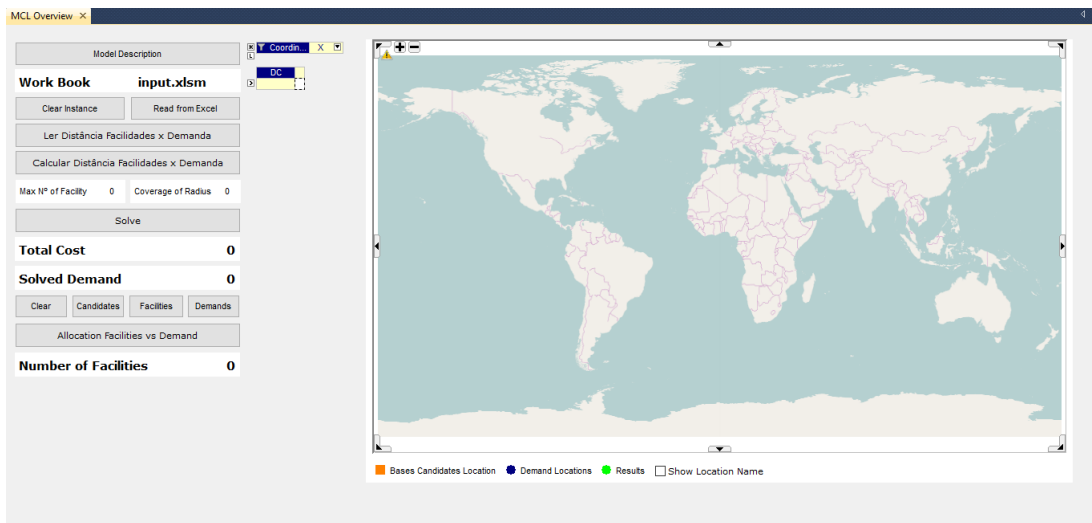


Figura 3.8: Tela do modelo de máxima cobertura (Visualização usuário).

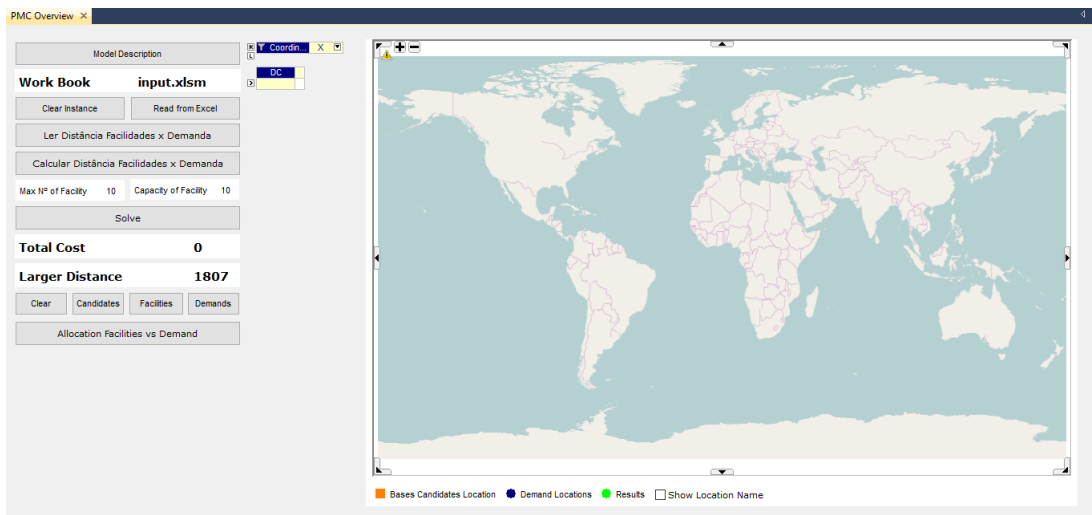


Figura 3.9: Tela do modelo p-mediana capacitado (Visualização usuário).

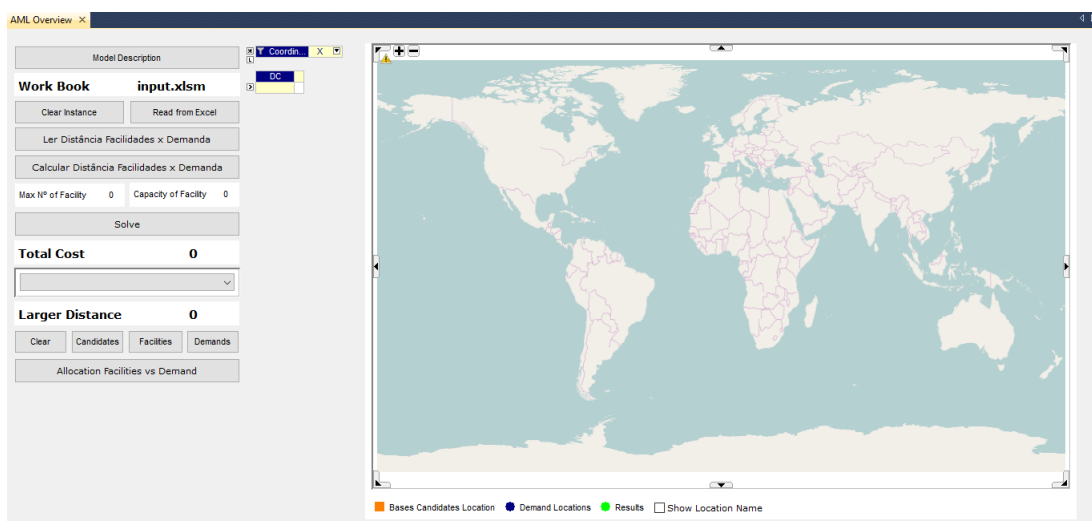


Figura 3.10: Tela do modelo de localização de viaturas multi-período (Visualização usuário).

Capítulo 4

Estudo de Caso

Neste capítulo apresentamos dois estudos de caso, um deles aplicado ao município de Caicó-RN e outro a Recife-PE. As Seções 4.1 e 4.2 apresentam os respectivos cenários utilizados como base nesta pesquisa. Os estudos de caso variam nos números das ocorrências e possibilitam a análise da aplicabilidade do modelo e dos métodos de solução em cenários de diferentes esferas.

A escolha desses dois cenários utiliza como base justificativa o trabalho de Gurgel [24], onde foram apresentados dados que mostram o estado de PE como sendo o de maior número de ocorrências de homicídios no ano de 2001. Nesse mesmo estudo, o RN foi citado por apresentar a maior taxa de crescimento do número de homicídios.

4.1 Estudo de Caso Caicó-RN

O município de Caicó fica localizado na região do Seridó, interior do estado do RN, distante 282km da capital Natal. Criada na condição de distrito em 1748, teve sua emancipação política decretada no ano de 1868 [17]. Contando com uma extensão territorial de 1.228.583 quilômetros quadrados [17]. Ainda não foi instituída uma lei que regulamente a extensão territorial, mas é possível visualizar na Figura 4.1 (visualização dos limites territoriais), que a zona urbana do não ocupa 100% da extensão do município. A cidade possui 31 bairros e 3 distritos, e faz limite com 10 outros municípios do RN e um município do estado da Paraíba - PB. Caicó é considerada a principal cidade da microrregião do Seridó Ocidental,

por concentrar atividades econômicas, comércio, indústria, saúde, educação e segurança.

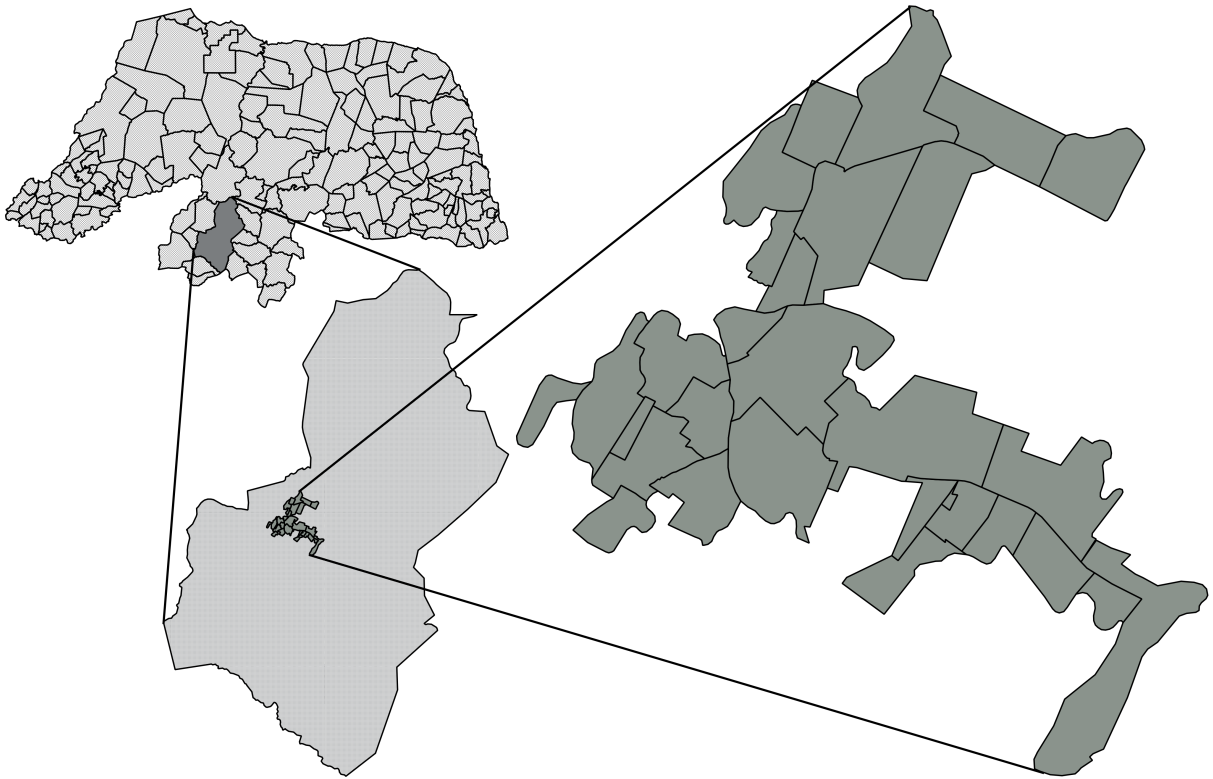


Figura 4.1: Limites do Município de Caicó.

Conforme dados de 2016 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE [17], a cidade tem uma população de 67.747 habitantes, informações que a colocam como a sétima cidade mais populosa do estado, com uma densidade populacional de 51,04 habitantes por quilômetro quadrado, sendo a segunda mais populosa do interior do RN (perdendo apenas para Mossoró) [17].

Na área da segurança, o município sedia o 6º BPM, criado em 1994, sendo subordinado ao Comando de Policiamento do Interior - CPI, e comandando o policiamento de toda região do Seridó potiguar, através do 2º Comando de Policiamento Regional - CPR II. A 1ª Companhia de Polícia Militar (CPM) situada na cidade de Caicó, dispõe dos serviços de policiamento com rádio patrulha, policiamento a pé, Ronda Ostensiva com Apoio de Motocicletas - ROCAM, policiamento montado, policiamento especial - Grupo Tático de Combate e policiamento ambiental [20].

A 1ª CPM conta com 23 viaturas em trabalhos de policiamento, sejam elas, no patrulhamento de trânsito, policiamento ambiental, trabalhos de inteligência, grupos de operações táticas, grupamento de combate, e 7 viaturas no trabalho de rádio patrulhamento. As demais equipes de policiamento, apesar de realizarem trabalhos de importância equivalente, não entram no planejamento de patrulhamento ostensivo da cidade, foco dos estudos deste trabalho. As equipes destinadas ao policiamento de rádio patrulha, realizam uma rotatividade nos horários de atividade, por esse motivo em boa parte do tempo, a frota não fica 100% disponível. É necessário que as viaturas realizem paradas para manutenção, abastecimento, descanso e alimentação dos membros das equipes.

Atualmente as viaturas são alocadas em pontos e regiões de acordo com a estatística das ocorrências, que em determinados momentos recebem a orientação dos trabalhos de inteligência do 6º BPM. O atendimento nos distritos do município e zona rural, são realizados por equipes de policiamento especializados. Nas ocorrências de trânsito, as equipes de rádio patrulha podem realizar o primeiro atendimento e são rendidas por equipes do policiamento especializado, que são responsáveis pelo policiamento de trânsito em rodovias estaduais, mas que no município realizam esta atividade também na zona urbana, pelo motivo do município não dispor dos serviços de guarda municipal.

Os números de ocorrências policiais referentes ao município de Caicó foram fornecidos pela Central de Operações da Polícia Militar (COPOM) deste município, e a base cartográfica digital do município foi produzida durante o desenvolvimento deste trabalho. O acesso aos registros foi realizado diretamente ao banco de dados, mediante autorização formal do comando do 6º BPM, conforme Anexo F.

Os dados apresentados receberam tratamento para efeito de sigilo do processo diário de planejamento e deslocamento das viaturas da 1ª CPM. A lista dos bairros da cidade está apresentada no anexo A, e no experimento receberam numeração de 1 a 31, sem que fosse realizada uma relação direta aos registros contidos na base de dados.

A base de dados fornecida contém 16.540 registros de ocorrências, contabilizados os anos de 2013 a 2015, dos quais foram considerados 94% (15565). Os registros de trotes e denúncias, casos em que não há a necessidade de deslocamento de viaturas, foram descartados para o experimento. Entre os registros, estão dados de atendimentos a ocorrências das mais diversas naturezas, incluindo atendimento a ocorrências de trânsito, policiamento ambiental, ronda escolar, apoio à órgãos financeiros, dependendo da disponibilidade e localização

das equipes no momento das ocorrências. As viaturas destinadas ao policiamento de rádio patrulha, realizam o policiamento ostensivo e são responsáveis pelo primeiro atendimento em 97% das ocorrências.

O acesso total aos registros das ocorrências possibilitou a realização de análises detalhadas dos dados, com a finalidade de fornecer os parâmetros de entrada para o desenvolvimento do modelo proposto. A análise referente ao tempo de resposta aos chamados de ocorrências, possibilitou uma estimativa sobre tempo médio de deslocamento das viaturas até o local, assim como uma estimativa do tempo médio de atendimento a cada ocorrência. A definição do tempo médio de atendimento foi utilizada para definir o número de turnos em que seria dividido um dia de trabalho e para a definição do número de ocorrências que cada equipe é capaz de atender em um turno.

A análise dos registros se torna também necessária pela necessidade da definição de uma previsão de demanda para cada turno definido no modelo, separados por pontos de demanda, nesse modelo representado pelos bairros. Nesse sentido foram realizadas várias análises na série temporal histórica dos registros, a fim de identificar uma técnica para previsão da demanda. A Figura 4.2 mostra o gráfico com a distribuição das ocorrências de cada mês durante os anos 2013 a 2015.

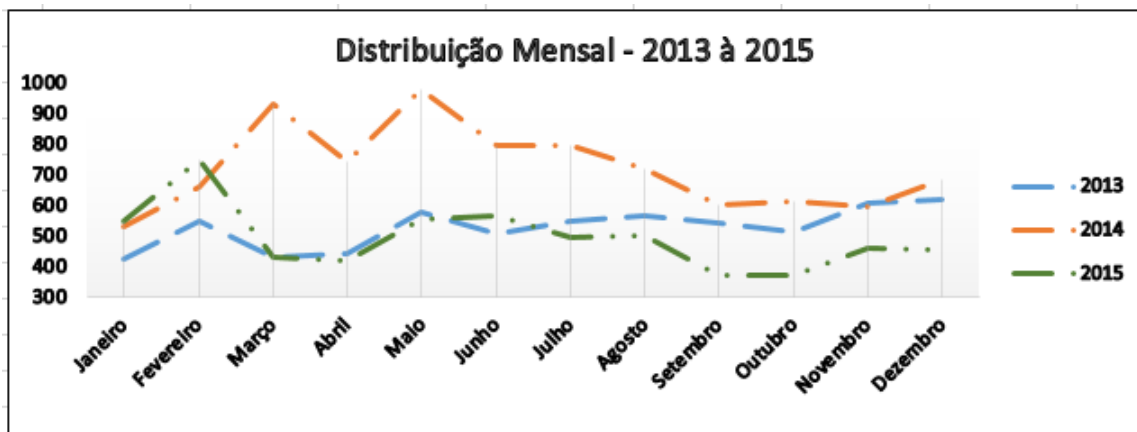


Figura 4.2: Distribuição Anual de Ocorrências em Caicó.

A Figura 4.3 apresenta uma nova distribuição das ocorrências nos meses dos anos 2013 a 2015, já com os dias divididos em 8 (oito) períodos. Analisando os dados apresentados é possível afirmar que não existe sazonalidade nos índices de ocorrências, embora seja possível visualizar uma tendência nos níveis de variação em alguns meses. Após analisar a série

temporal, já na perspectiva de turnos, foi identificada uma característica de série temporal que apresenta trechos nulos de ocorrências na série histórica (Figura 4.4), e que exige a utilização de técnicas específicas para esse tipo de distribuição, denominada Série Temporal Intermitente.

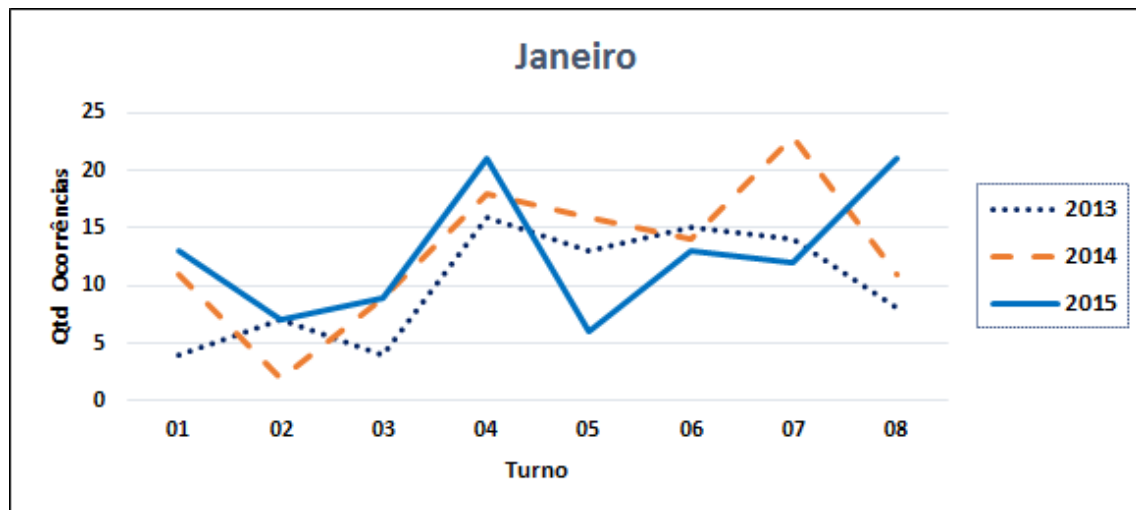


Figura 4.3: Distribuição Turno/Mês (Janeiro) de Ocorrências em Caicó.

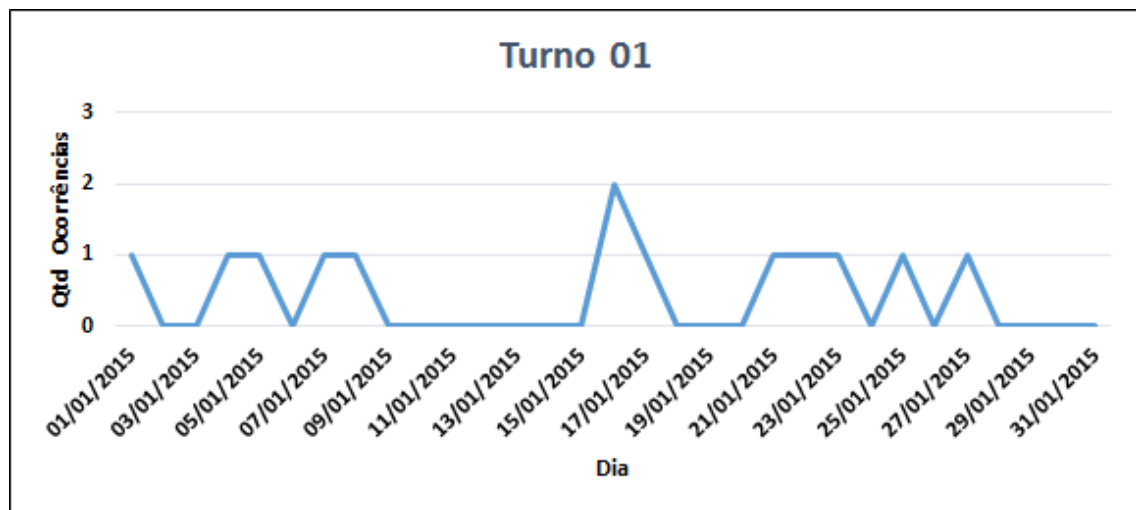


Figura 4.4: Distribuição Turno/Dias (Janeiro/2015) de Ocorrências em Caicó.

4.2 Estudo de Caso Recife-PE

O município de Recife (Figura 4.5), localizado na região metropolitana do Grande Recife, além de cidade litorânea é também capital do estado de Pernambuco (PE). Com

origem no século XVI, teve sua emancipação política decretada no ano de 1709, na época desmembrada da cidade de Olinda, como Vila de Santo Antônio do Recife [17].

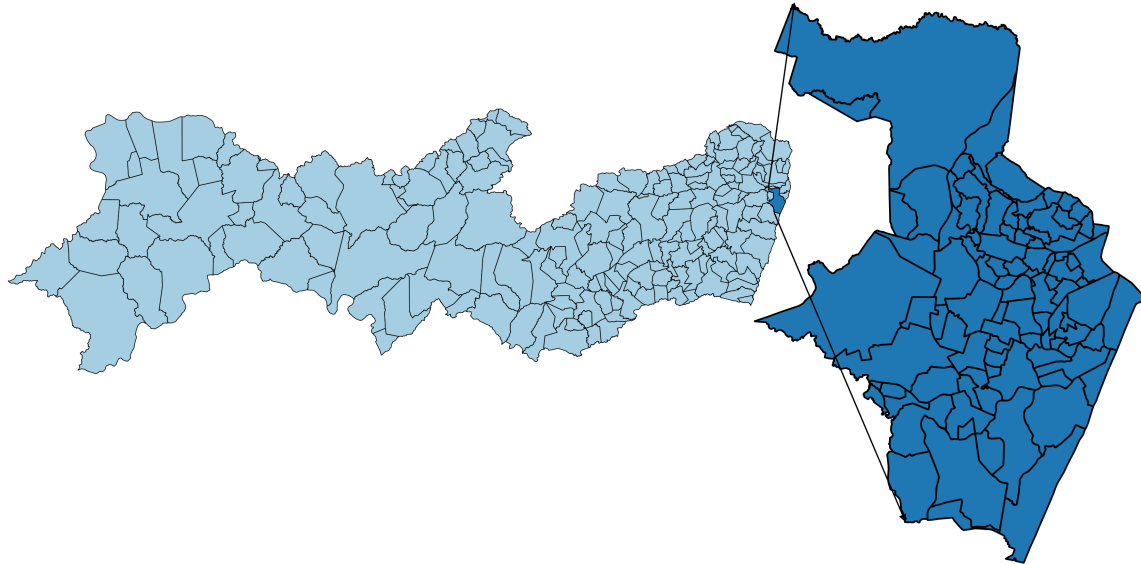


Figura 4.5: Limites do Município e bairros de Recife.

Fonte: Adaptado pelo autor de IBGE/Prefeitura do Recife.

Com uma extensão territorial de 218.435 quilômetros quadrados [17], a cidade possui oficialmente, nos registros da prefeitura, 94 bairros divididos em 6 Regiões Político Administrativas, e faz limite com outros 5 municípios da região metropolitana do Grande Recife, que é composta no total por 14 municípios.

Conforme dados dos levantamentos realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) do ano de 2016, o município possui 1.625.583 habitantes, e é a nona cidade mais populosa do país, sendo a terceira mais populosa do nordeste, com uma densidade populacional de 7.039,64 habitantes por quilômetro quadrado [17].

No período de realização deste trabalho, o policiamento do município contava com o efetivo policial de 10 batalhões de PM, sendo 5 deles especializados em Policiamento de Radio Patrulha, Policiamento de Choque, Polícia de Guarda, Polícia de Trânsito e um de Polícia Rodoviária; 3 Companhias Independentes, sendo uma de Operações especiais e outra de Policiamento com Cães, e a terceira de Apoio ao Turista, além de um Regimento de Polícia Montada, todos subordinados diretamente a Diretoria Integrada Metropolitana (DIM), que dispõe ainda de outras 5 unidades de Polícia na região metropolitana do Grande Recife [19].

Os números de ocorrências policiais referentes ao município de Recife foram fornecidos pelo Centro Integrado de Operações de Defesa Social (CIODS) da Secretaria de Defesa Social (SDS) do estado de PE, e a base cartográfica digital do município está disponível na página oficial da Prefeitura Municipal do Recife (PMR). Os registros foram disponibilizados através de planilha eletrônica, contendo somente informações referentes ao bairro e horário das ocorrências.

Os dados apresentados receberam tratamento para efeito de sigilo do processo diário de planejamento, sendo que nesse caso, não tivemos acesso as informações sobre como o CIODS posiciona e orienta deslocamento das viaturas sob seu comando. Assim como, não foi possível identificar se nos registros fornecidos haviam casos de denúncia e trotes. Nessa base os tratamentos aplicados, foram no sentido de eliminar registros que continham informações de bairros não pertencentes ao município de Recife, e em alguns casos registros contendo o nome de comunidades ao invés do bairro, onde nesses casos foi identificado o bairro ao qual a comunidade estava inserida e alterado nos registros. Os nomes dos bairros da cidade foram substituídos neste trabalho por números de 1 a 94, sem que haja quaisquer relação com a ordem de registro dos bairros na base de dados. A base de dados fornecida possui 368.969 registros de ocorrências, contabilizados os anos de 2013 a 2015, dos quais foram considerados 95% (351.221).

4.3 Parâmetros de Entrada do Modelo

Nesta seção estão descritos os procedimentos realizados no sentido de gerar os dados de entrada para aplicação dos estudos de casos. A previsão da demanda, gerada com base nos dados históricos extraídos das bases de dados das centrais de registro de ocorrências da PM, os procedimentos para geração aleatória dos pontos candidatos à alocação das viaturas e dos pontos que representam os locais de ocorrências policiais, e por fim a subseção demonstrando as técnicas utilizadas para montagem da matriz de distância entre os pontos gerados na subseção que acaba de ser descrita.

4.3.1 Previsão de Demanda

Em decorrência da particularidade que envolve a distribuição estatística das ocorrências nos municípios objetos de estudo neste trabalho, utilizamos a Simulação de Monte Carlo para definição da demanda a ser utilizada como dados de entrada para aplicação dos modelos.

O cálculo da Simulação de Monte Carlo para a previsão de demanda foi elaborado por meio dos registros de ocorrências da série histórica de três anos. Foram fornecidos dados referentes aos registros de ocorrências do período de 01/01/2013 a 31/12/2015, conforme descritos nas Seções 4.1 e 4.2.

A geração de números e a Simulação de Monte Carlo para a previsão de demanda nos registros de ocorrência foram realizadas no *Microsoft Excel* [30], por meio da equação (4.1), que forneceu valores de demanda simulada.

$$DEMANDA = PROCV(ALEATORIOENTRE(inferior; superior), \quad (4.1) \\ matriz_tabelanumero_indice_coluna; procurarintervalo)$$

A simulação foi realizada 30 vezes e extraída a mediana dos resultados obtidos, no sentido de utilizar como base para determinar o número de ocorrências nos estudos de caso. Apresentamos nas Figuras 4.6 e 4.7, respectivamente, os resultados da simulação realizada sob as bases de dados descritas nas Seções 4.1 e 4.2. Nos gráficos apresentados, é possível visualizar o valor encontrado para às medianas.

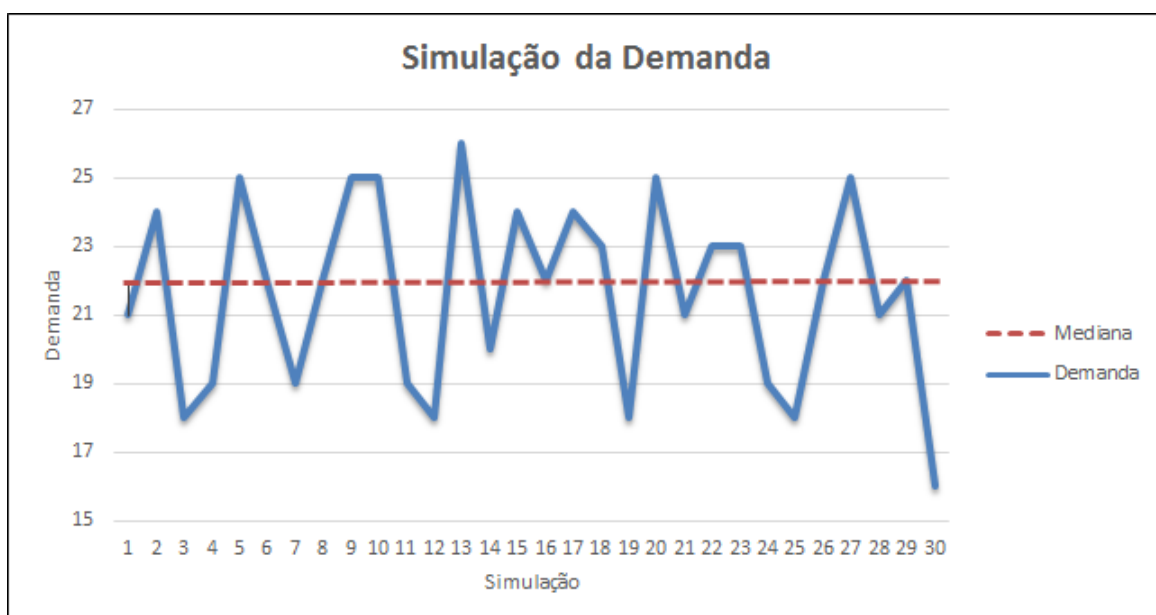


Figura 4.6: Resultados da simulação com base nos registros de Caicó.

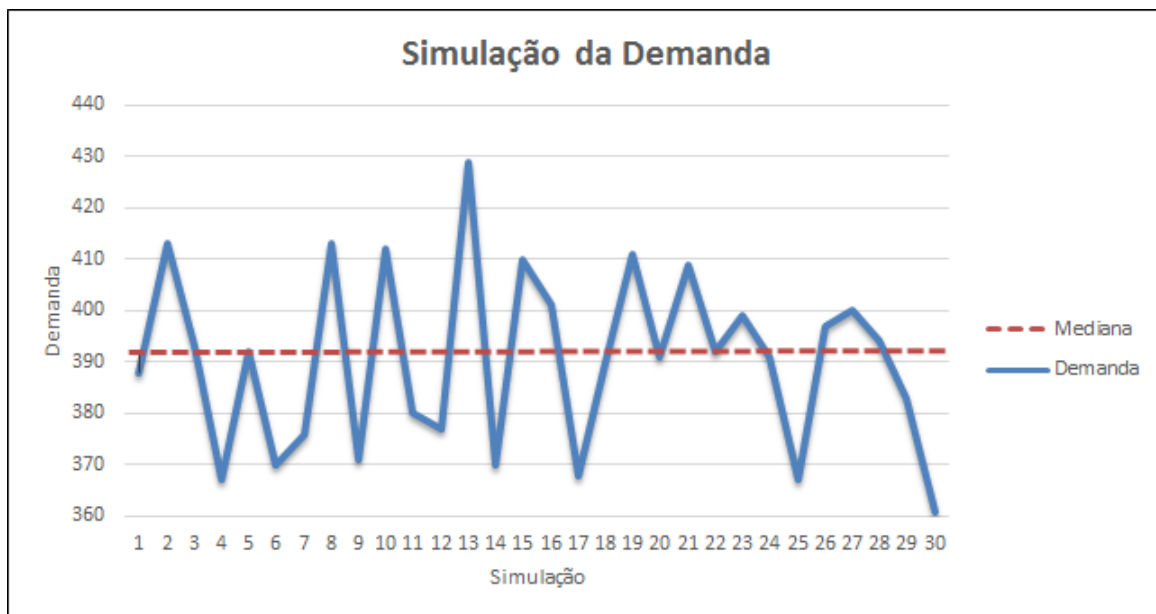


Figura 4.7: Resultados da simulação com base nos registros de Recife.

As medianas foram extraídas com o intuito de embasar a escolha do número de ocorrências a ser utilizado na geração dos pontos que representam os locais de ocorrências policiais, conforme descritos na subseção a seguir.

4.3.2 Localização de Ocorrências e Pontos Candidatos à Localização-Alocação de Viaturas

No Estudo de Caso Caicó, descrito na Seção 4.1, os pontos que representam os locais de ocorrências policiais e os pontos candidatos à localização-alocação de viaturas, foram fornecidos pelo COPOM, e são pontos utilizados em estudos do departamento. Apresentamos na Figura 4.9, a distribuição dos pontos de ocorrências, enquanto que a Figura 4.8, representa uma distribuição possível dos pontos candidatos à localização-alocação de viaturas. Como é possível visualizar nas Figuras 4.8 e 4.9, nesse estudo de caso não foi necessário a utilização da ferramenta QGIS, sendo possível apresentar diretamente no mapa da aplicação desenvolvida nessa pesquisa.

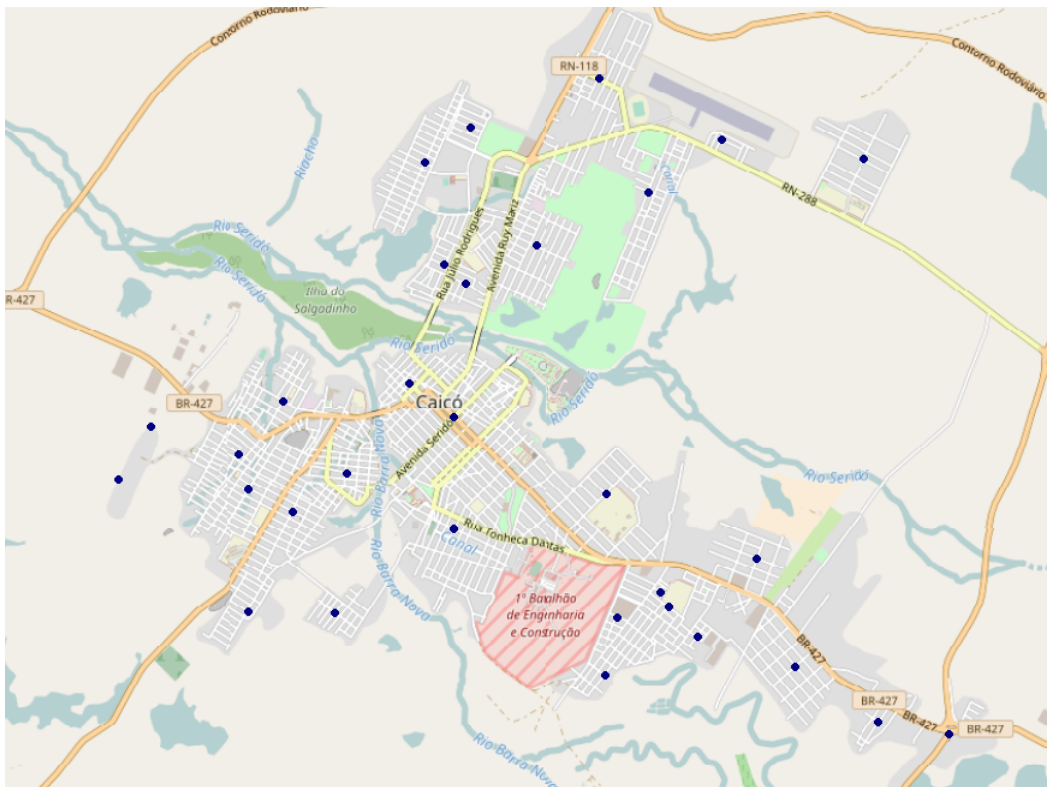


Figura 4.8: Pontos de ocorrências policiais nos bairros de Caicó (AIMMS).

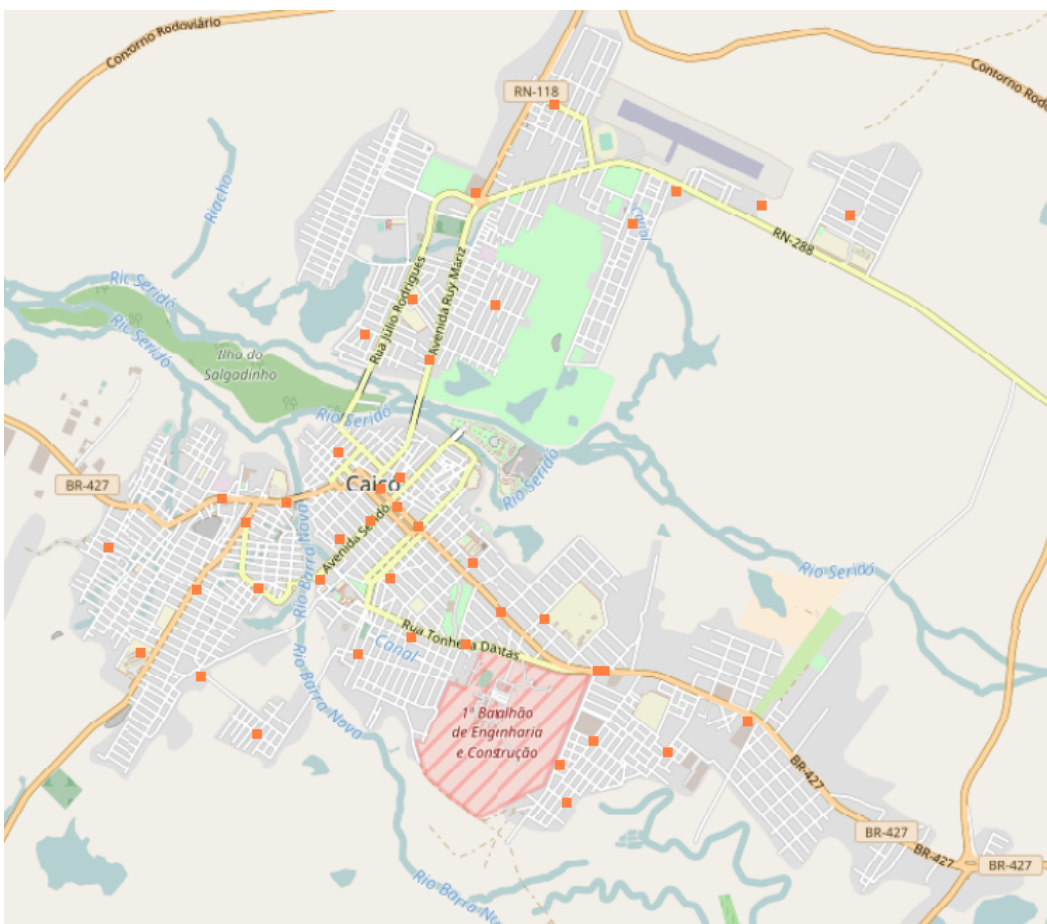


Figura 4.9: Pontos para localização-alocação de viaturas em Caicó (AIMMS).

No Estudo de Caso Recife, descrito na Seção 4.2, por não ter sido possível o acesso às informações sobre os pontos de ocorrência registrados na base, foram gerados pontos aleatórios para representar os locais de ocorrências e os pontos candidatos à localização-alocação de viaturas. O complemento *fTools* da ferramenta QGIS foi utilizado para gerar pseudo-pontos aleatórios sobre a camada dos mapas geográficos, que representam os bairros da cidade do Recife.

Nas Figuras 4.10(a) e 4.10(b) são apresentados, simulações da distribuição dos pontos candidatos à localização-alocação de viaturas e da distribuição dos pontos de ocorrências, gerados com base nos valores obtidos conforme descrito no tópico Previsão de Demanda (4.3.1). A informação de quantos pontos aleatórios devem ser criados em cada polígono, é fornecida através de um valor numérico existente em um campo da tabela de atributos do mapa, criado especificamente para essa finalidade.

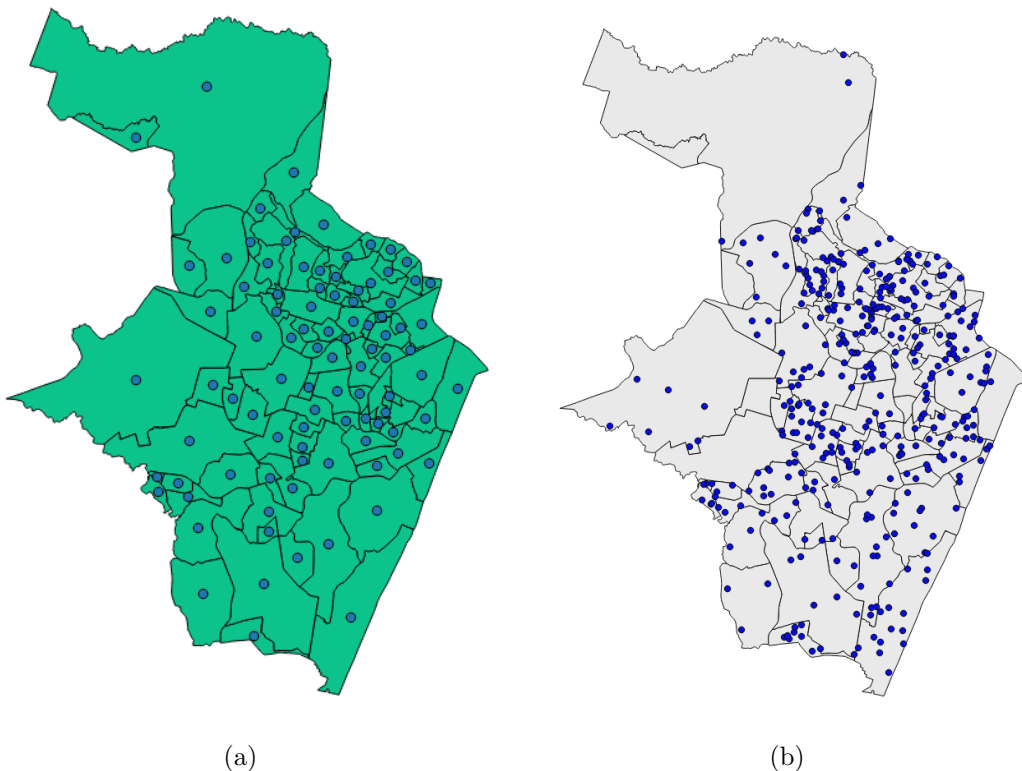


Figura 4.10: Pontos para alocação de viaturas no Recife.

Os pontos de ocorrências e pontos candidatos à alocação de viaturas apresentados nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10, são bases para o povoamento da matriz de distância utilizada como parâmetro de entrada para execução do modelo através da ferramenta construída neste trabalho.

Matriz de Distância

O cálculo das distância entre os pontos representando as ocorrências e os pontos candidatos à localização-alocação de viaturas são fornecidos através de uma matriz de distâncias como a apresentada na Tabela 4.1. A construção dessa matriz, foi realizada através do *Google Maps*, utilizando a *Application Program Interface - API* [16] para obter as distâncias entre os pontos informados, utilizando como parâmetros as coordenadas de latitude e longitude. Para a implementação desta heurística foi utilizada a linguagem *VBA (Visual Basic for Applications)* através de uma macro implementada no *Microsoft Excel*.

A Tabela 4.1 ilustra a estrutura da matriz de distância entre os pontos candidatos à localização-alocação de viaturas e os pontos que representam os locais de ocorrências policiais. Esta matriz é utilizada pelo modelo, no sentido de escolher qual o ponto candidato à alocação de viaturas está mais próximo da ocorrência, a fim de atingir o principal objetivo do modelo, que é a minimização dos custos em relação ao deslocamento.

Tabela 4.1: Matriz de Distâncias entre Pontos de Ocorrências \times Candidatos à Instalação

	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9	\dots	J_j
I_1	1300	520	685	780	9123	1342	1090	3450	349	\dots	3420
I_2	850	450	952	1090	3450	349	780	9123	1342	\dots	975
I_3	780	9123	1342	1300	520	685	3450	349	1300	\dots	1090
I_4	1090	3450	349	685	1090	3450	349	780	9123	\dots	640
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
I_i	753	3210	752	1090	3450	349	1300	520	685	699	2975

A *Application Program Interface - API* especifica um limite padrão de 1.000 solicitações gratuitas no período de 24 horas. Se o aplicativo exceder o limite inicial, apresentará falhas, não fornecendo o valor esperado da distância entre os pontos. O limite pode ser aumentado até 150.000 consultas por período de 24 horas, se ativado a cobrança no *Google API Console* para confirmar sua identidade [16].

O Estudo de Caso Recife (Seção 4.2), apresenta uma matriz de distância que exigiria um número alto de consultas utilizando a *API* do *Google*¹. Tomando como base as limitações no número de consultas, optamos por utilizar o cálculo de distância euclidiana, realizado em

¹<https://developers.google.com/maps>

tempo de execução pelo software de modelagem matemática utilizado nos experimentos, conservando-se a estrutura apresentada na Tabela 4.1.

4.4 Cenários Analisados

Nesta seção são descritos os cenários que compõem o estudo de caso, e suas respectivas particularidades. Utilizamos três cenários, o primeiro aplicado com dados do município de Caicó-RN e os outros dois com dados do município de Recife-PE. Além do modelo de Problema de Localização-Alocação Multi-Período (PLMP) que estamos utilizando como proposta de solução, são avaliados também os modelos básicos de Problema de Localização de Máxima Cobertura (PLMC) e o Problema de Localização p-Mediana Capacitada (PLpMC). Esses modelos adicionais possibilitam que sejam avaliados cenários, buscando identificar os locais para alocar viaturas de forma a atender o maior número possível de ocorrências dentro de um certo raio de cobertura, dado um número fixo de viaturas, enquanto que o outro define locais para alocar as viaturas buscando a redução das distâncias entre as localizações das viaturas até os locais de ocorrências, considerando nesse caso uma limitação na capacidade que cada equipe (viatura) tem em atender um certo número de ocorrências e mantendo o atendimento a 100% das ocorrências.

Cenário 1

O Cenário 1 foi desenvolvido para o estudo de caso da cidade de Caicó, descrito na Seção 4.1. Os locais de ocorrências e pontos candidatos foram distribuídos de tal forma a aproximar-se de situações operacionais reais. Nesse caso, como tínhamos acesso aos registros, realizamos uma consulta na base de dados para identificar o dia em que o registro de ocorrências foi igual ao valor da mediana obtida nas simulações, e utilizamos os registros desse dia para aplicação do modelo. A Tabela 4.2 apresenta a distribuição das 22 ocorrências distribuídas nos turnos, número obtido através da média dos valores resultantes da simulação.

Tabela 4.2: Ocorrências por turnos - Cenário 1.

Turnos	01	02	03	04	05	06	07	08
Ocorrências	07	02	01	00	04	03	02	03

O número inicial de viaturas disponíveis foi determinado pelo maior número de equipes em ação durante o dia, e foi sendo alterado a fim de simular a redução de recursos disponíveis para alocação dos serviços. Foi aplicado a redução de 1 viatura a cada iteração, até que o número de viaturas deixasse de atender 100% das ocorrências. Foi determinado o valor 2 (dois) como capacidade de atendimento de uma viatura em cada horizonte de planejamento.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos com aplicação dos modelos. Na coluna Viaturas Disponíveis é apresentado o número disponibilizado para cada execução dos modelos. Para cada modelo foram anotados: o custo total de deslocamento, representando a soma de todas as distâncias percorridas entre os pontos em que as viaturas foram alocadas até os locais das ocorrências; na coluna Raio é apresentado o valor de maior deslocamento, referente à distância máxima que uma viatura precisou percorrer para atender uma determinada ocorrência e na coluna Viaturas é apresentado o número de equipes alocadas por cada modelo utilizado. No modelo PLMC essa distância é também conhecida como raio de cobertura.

Tabela 4.3: Resultados do Cenário 1.

Viaturas disponíveis	PLMC			PLpMC			PLMP		
	Custo	Raio	Viaturas	Custo	Raio	Viaturas	Custo	Raio	Viaturas
07	19.385	1.807	05	11.839	1.807	07	8.522	1.807	06
06	19.385	1.807	05	13.021	1.807	06	8.522	1.807	06
05	19.385	1.807	05	15.400	1.807	05	9.369	1.807	05
04	20.861	1.825	04	19.174	2.476	04	10.745	1.807	04
03	22.779	2.018	03	23.109	2.563	03	-	-	-
02	47.760	3.344	02	37.245	5.510	02	-	-	-
01	54.292	4.410	01	-	-	-	-	-	-

Com a aplicação do PLMC, mesmo nos casos com disponibilidade de 07 e 06 viaturas, o modelo apresenta solução igual ao caso com instalação de 05 viaturas. O custo total nesses casos foi de 19.385 metros e o raio de cobertura (deslocamento) foi definido em 1.807 metros. Nesse modelo busca-se a definição do número de viaturas dado um raio de cobertura, mantendo-se o atendimento ao maior número possível de ocorrências. Nesse sentido,

verificamos a variação no número de viaturas alocadas a medida que o raio de cobertura aumenta. Esse número passou a variar quando o raio de cobertura foi definido em 1.825 metros, alocando nesse caso, 04 viaturas. Com esse modelo, foi possível avaliar a variação no raio de cobertura de tal forma a encontrarmos solução com até uma viatura alocada, mantendo-se o atendimento a 100% das ocorrências. De forma particular, identificamos que com esse modelo o aumento no custo total de deslocamento cresce de forma significativa e desproporcional.

Com a aplicação do modelo do PLpMC as viaturas disponíveis são 100% alocadas em todos os cenários. Com esse modelo não foi encontrada solução para aplicação com apenas uma viatura disponível. Mesmo não sendo possível controlar o raio de cobertura (deslocamento), apenas a disponibilidade de viatura é determinada pelo usuário, foi possível verificar a variação no raio de cobertura, assim como, no custo total de deslocamento.

A aplicação do modelo para o PLMP, que propomos para a modelagem do problema, permite a verificação do custo total de deslocamento das viaturas, considerando a alocação de viaturas em janelas de planejamento. Os valores de custo total apresentados, são referentes à soma das distâncias percorridas pelas viaturas em todos os períodos, considerando o total das ocorrências para os 08 períodos. Com esse modelo não foi possível encontrar soluções nos casos com menos de 04 viaturas disponíveis, visto a limitação na capacidade de atendimento das equipes (viatura) em cada período de planejamento. Seguindo essa lógica, com a aplicação do modelo para o PLMP o número de viaturas alocadas varia em cada período de acordo com o número de ocorrências, conforme apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Alocação de viaturas por período (PLMP) - Cenário 1.

Viaturas								
Disponíveis	Instaladas por Período							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	00-03h	03-06h	06-09h	09-12h	12-15h	15-18h	18-21h	21-24h
07	06	02	01	-	03	03	02	03
06	06	02	01	-	03	03	02	03
05	05	02	01	-	03	03	02	03
04	04	02	01	-	03	03	02	03

Essa relação estabelecida entre o número de viaturas alocadas e a previsão de

ocorrências, justifica o fato de não terem sido encontradas soluções para os casos com menos de 04 viaturas disponíveis, em decorrência da capacidade de atendimento das equipes. Essa relação justifica também o fato de não ter sido alocada nenhuma viatura no período 4, em decorrência do fato deste período não haver previsão de ocorrências e o modelo considerar não ser necessário alocar viaturas.

Cenário 2

O Cenário 2 foi desenvolvido para simular o estudo de caso baseado nos registros da cidade de Recife, descrito na Seção 4.2. O número de ocorrências foi determinado através da simulação baseada na série histórica, seguindo o que foi descrito na Seção 4.3.1, estes pontos foram distribuídos de forma aleatória, conforme descrito na Seção 4.3.2. O número de registros obtido calculando-se a mediana dos resultados da simulação foi de 392 ocorrências/dia. A Tabela 4.5 apresenta a distribuição das 392 ocorrências nos turnos.

Tabela 4.5: Ocorrências por turnos - Cenário 2.

Turnos	01	02	03	04	05	06	07	08
Ocorrências	60	23	25	50	38	54	59	83

Os pontos candidatos à alocação de viaturas foram determinados de forma aleatória, no entanto, utilizamos como restrição o que foi proposto por Valla[43], que recomenda uma viatura para cada 15 mil habitantes. Nesse sentido, foram geradas 05 diferentes distribuições para os pontos candidatos à alocação das viaturas. A cada distribuição foi aplicada uma restrição de distância entre os pontos, conforme apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Restrição distância x Pontos candidatos à localização-alocação de viaturas.

Restrição (m)	900 metros	800 metros	700 metros	600 metros	500 metros
Pts. candidatos (und)	235	275	327	383	470

O número inicial de viaturas disponíveis foi determinado através do cálculo obedecendo a mesma orientação que trata do número de viaturas por habitantes [43], aplicando-se uma proporção entre o número de habitantes do município de Recife, atribuindo uma equipe para cada 15 mil habitantes, chegando ao número total de 102 viaturas. Assim como na aplicação com o Cenário 1, o número de instalações (viaturas disponíveis) foi sendo alterado

a fim de simular a redução de recursos disponíveis para alocação. Nesse cenário a redução ocorreu em um número de 10 a cada interação, até que o número de viaturas deixasse de atender 100% das ocorrências. Aqui também foi considerado que cada equipe é capaz de atender 02 ocorrências por período. Nesse cenário também foram aplicados os modelos do PLMC, PLpMC e PLMP. Para cada modelo foram avaliadas as 05 distribuições de pontos candidatos à instalação de viaturas.

A aplicação do modelo do PLMC tem como finalidade determinar o número mínimo de viaturas que devem ser alocadas de forma a realizar a cobertura total das ocorrências. Este modelo aponta o número de instalações necessárias, considerando que cada uma deve atender um determinado raio de cobertura. Neste cenário, sabe-se que quanto menor o raio de cobertura, menor será o tempo gasto no deslocamento entre o ponto em que a viatura for alocada e o local da ocorrência. Em todos os experimentos foram disponibilizadas 102 viaturas e as simulações iniciadas com um raio de cobertura máximo, variando-se esse valor de forma a identificar o raio de cobertura que faria uso de todas as equipes disponibilizadas e buscando como resultado final a redução no custo total de deslocamento.

Para cada caso de distribuição dos pontos candidatos, foram extraídos: i) o custo total de deslocamento, ii) as ocorrências atendidas e iii) o número de viaturas que o modelo indicou para alocação. A Figura 4.11 apresenta os resultados obtidos com o PLMC para as diferentes distribuições de pontos candidatos, mostrando a variação do custo total de deslocamento em relação a variação do raio de cobertura. Fica evidente que quanto menor a área de cobertura exercida por cada viatura, menor será o custo total de deslocamento.

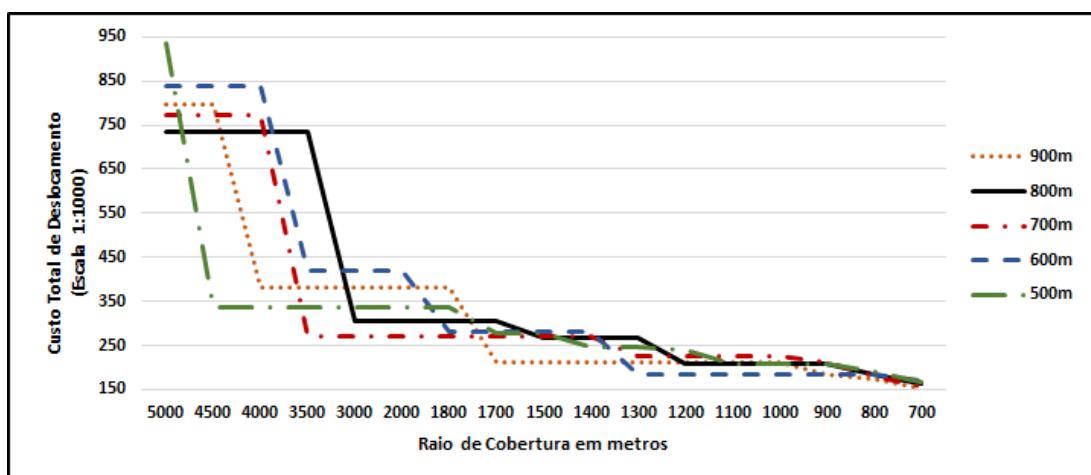


Figura 4.11: Custo Total Deslocamento \times Raio de Cobertura.

A Figura 4.12 mostra a relação entre as ocorrências atendida e o raio de cobertura.

Nesta figura é possível visualizar os cenários nos quais as ocorrências não são totalmente cobertas. Mesmo sobrepondo-se os resultados das Figuras 4.11 e 4.12, não é possível estabelecer uma relação de proporcionalidade com os cenários de restrição de distância entre os pontos candidatos, o custo total de deslocamento e o raio de cobertura determinado para execução do modelo.

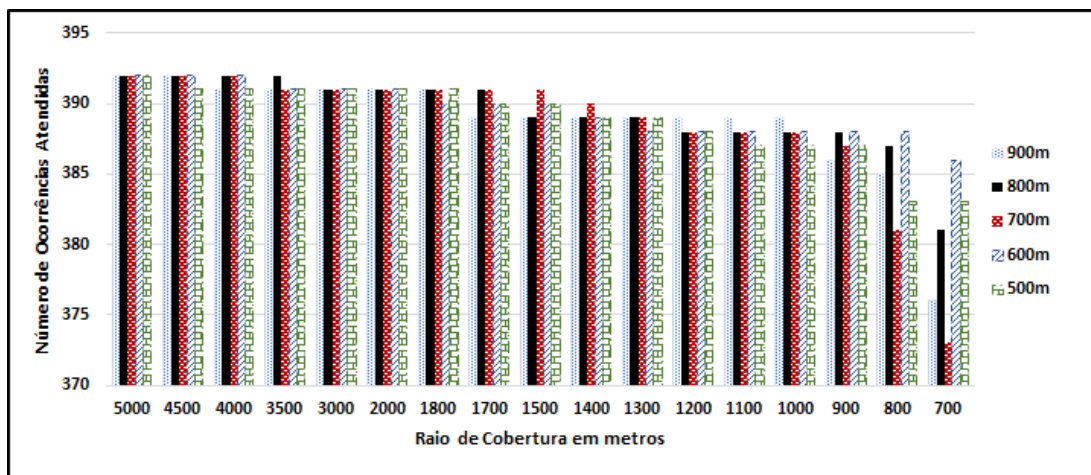


Figura 4.12: Ocorrências Atendidas × Raio de Cobertura.

Nos casos em que a redução no raio de cobertura impossibilita o atendimento a 100% das ocorrências, percebe-se que no caso com restrição de 500 metros entre pontos candidatos, o custo total de deslocamento é reduzido em aproximadamente 60% já na primeira redução do raio. Esse percentual é de pelo menos 50% nos demais casos, mas só ocorre na segunda e/ou até na quarta redução, quando o raio de cobertura já diminuiu em até 1500 metros. Essa redução no raio de cobertura impacta também no atendimento as ocorrências. Nas primeiras alterações no raio, em pelo menos um dos casos, 01 ocorrência (demanda) já deixa de ser atendida. A redução no custo total de deslocamento continua ocorrendo a medida que o raio de cobertura diminui, e em consequência um número maior de ocorrências também deixam de ser atendidas.

A alteração no raio de cobertura exerce influência também no número de viaturas alocadas, que cresce a cada redução no raio de cobertura (Figura 4.13). Esse número só atingiu o número de disponibilidades em um caso, com restrição de distância entre os pontos candidatos estipulada em 600 metros e esse caso também apresentou o menor valor do custo total de deslocamento. Todos os casos de restrição entre os pontos candidatos, apresentou em algum momento exceção no que diz respeito a variação crescente no número de viaturas alocadas. Em algumas simulações o número de viaturas alocadas sofre uma redução,

acompanhando a redução no raio de cobertura.

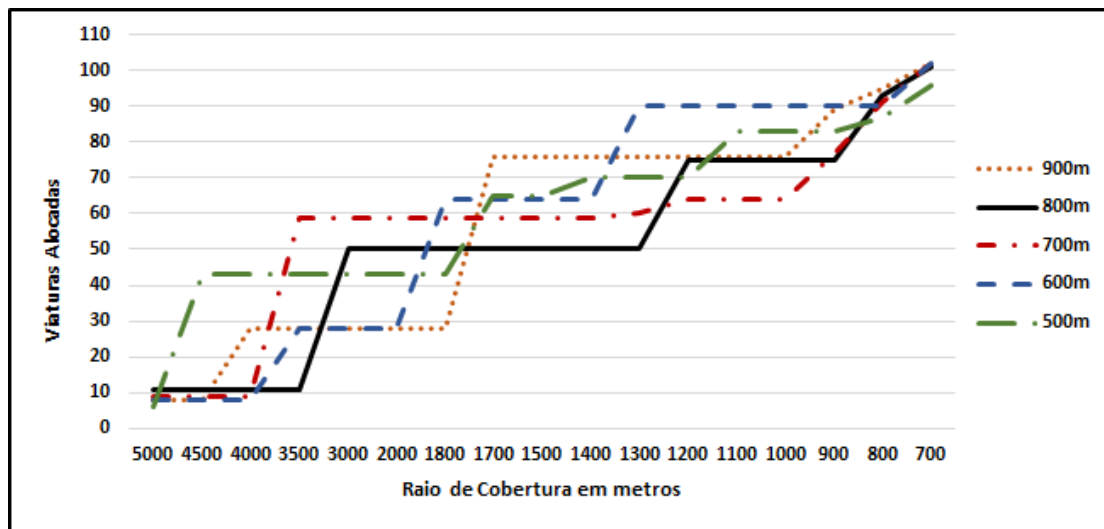


Figura 4.13: Viaturas Alocadas \times Raio de Cobertura.

Analisando-se os casos de restrição entre os pontos candidatos, o caso com restrição de 500 metros mantém-se mais estável com as alterações no raio de cobertura. Esse caso, apesar de apresentar o maior custo de deslocamento quando o raio é 5000 metros, após a primeira redução ele passa a apresentar melhores resultados, que os demais casos de restrição entre os pontos candidatos. No que diz respeito à alocação das viaturas, não é possível determinar qual dos cenários apresenta melhores resultados, seja para uma melhor cobertura ou para otimização no uso das viaturas, sendo necessário uma análise por parte dos gestores para cada cenário de atuação.

A aplicação do modelo para o PLpMC busca minimizar a soma das distâncias entre os locais em que as viaturas foram alocadas e os pontos de ocorrências policiais. Com esse modelo todas as simulações foram realizadas com a exigência de atendimento à 100% das ocorrências (demanda), considerando ainda a capacidade de atendimento para cada instalação. Os resultados são apresentados na Figura 4.14, seguindo a mesma lógica utilizada no modelo anterior, relacionados por casos de restrição de distância entre os pontos candidatos à alocação das viaturas. Os valores do custo total de deslocamento são apresentados em função do número de viaturas alocadas.

As simulações com esse modelo foram aplicadas variando-se o número de viaturas disponíveis. Em todos os casos de distribuições dos pontos candidatos, a cada redução no número de viaturas disponíveis o custo total de deslocamento aumentou. Apesar do modelo não trabalhar qualquer busca por otimização no raio de cobertura (distância máxima

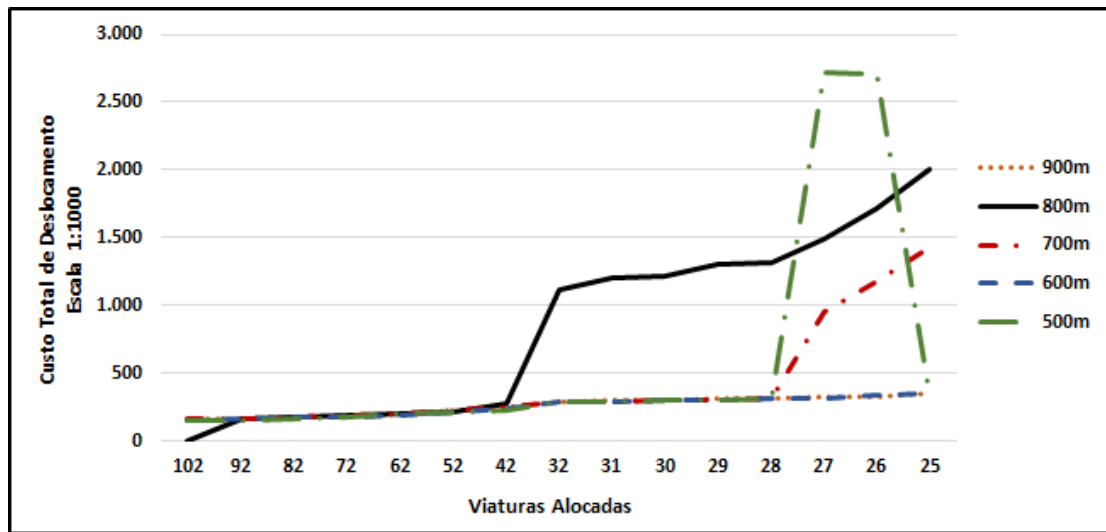


Figura 4.14: Custo Total de Deslocamento × Viaturas Alocadas.

percorrida pelas viaturas), a ferramenta desenvolvida possibilita a visualização desses valores. É possível identificar (Figura 4.15) que essas alterações no raio de cobertura não ocorreram com frequência nas simulações com esse modelo, e mantiveram-se inalterados até que o número de viaturas alocadas fosse igual a 42.

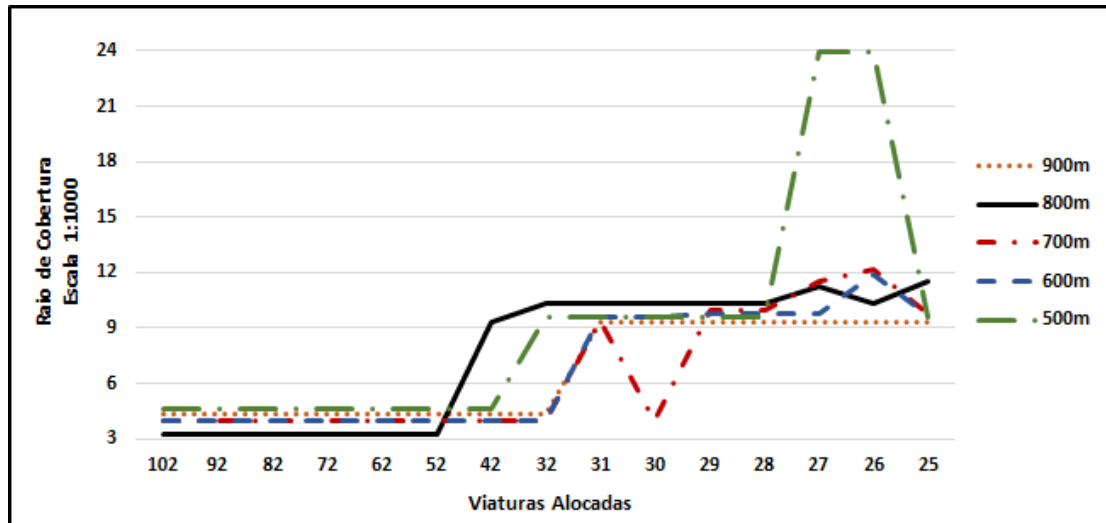


Figura 4.15: Raio de Cobertura × Viaturas Alocadas.

No caso em que a restrição de distância entre os pontos candidatos foi de 800 metros, quando o número de viaturas alocadas foi igual a 32, além do crescimento diferenciado no raio de cobertura, o custo total de deslocamento sofreu um aumento de quase 400%. Esse aumento no custo total de deslocamento foi constatado também nos casos com restrição de 700 e 500 metros, mas somente quando o número de viaturas disponíveis se aproximou do limite possível para alocações. Entre os demais casos, é possível afirmar que quando

aplica-se uma redução na distância entre os pontos candidatos à alocação de viaturas, os casos com restrição de 900 metros e 600 metros, ocorrem uma ligeira redução no custo total de deslocamento. Na Figura 4.16 apresentamos os resultados destes dois cenários, onde é possível constatar a semelhança entre os resultados, assim como destacar a pequena vantagem no uso do cenário com 600 metros de restrição entre os pontos candidatos à instalação de viaturas.

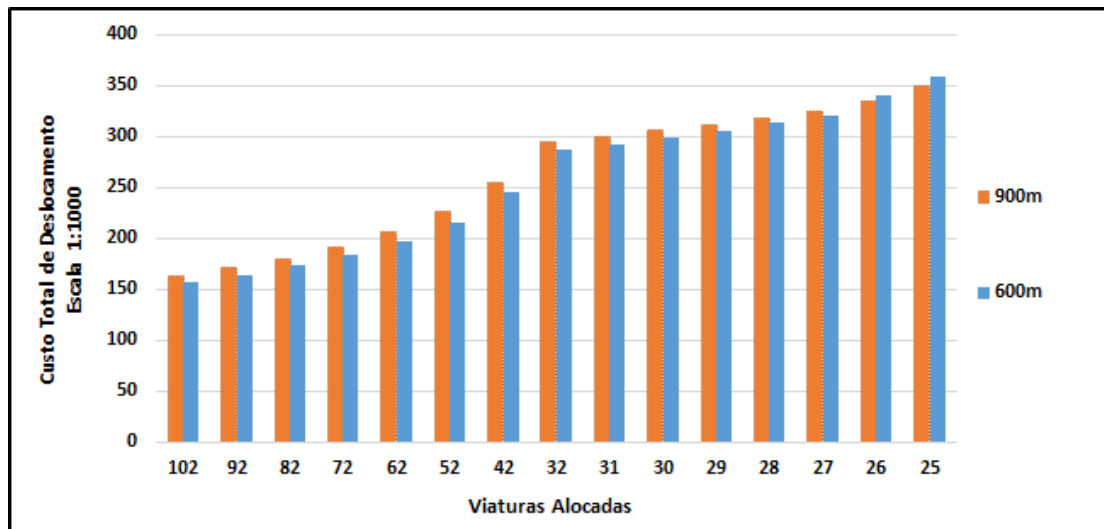


Figura 4.16: Custo Total de Deslocamento \times Viaturas Alocadas. Destaque para os cenários de 900m e 600m

O último modelo aplicado foi o PLMP, que busca minimizar o custo total de deslocamento, considerando a aplicação em múltiplos períodos de tempo. Os resultados da aplicação desse modelo são apresentados na Figura 4.17.

A Figura 4.17 ilustra ainda uma relação entre os resultados das simulações dos casos que representam as restrições entre os pontos candidatos à localização-alocação de viaturas. Para cada diferente distribuição entre os pontos candidatos foi avaliada a relação entre o número de viaturas disponibilizadas e o deslocamento total para atender as ocorrências. A cada caso em que se aplica uma redução na restrição de distância máxima entre os pontos candidatos à alocação de viaturas, observa-se uma redução no custo total de deslocamento.

O número de ocorrências seguiu uma distribuição por turno/período apresentados na Tabela 4.5. Com a aplicação desse modelo os resultados referentes aos custos totais de deslocamento aumentam gradativamente a medida que o número de viaturas disponíveis vai sendo reduzido. Observado os números apresentados na Tabela 4.7 referentes à alocação de viaturas por turno/período, é possível constatar que o modelo alocou no máximo 62 viaturas,

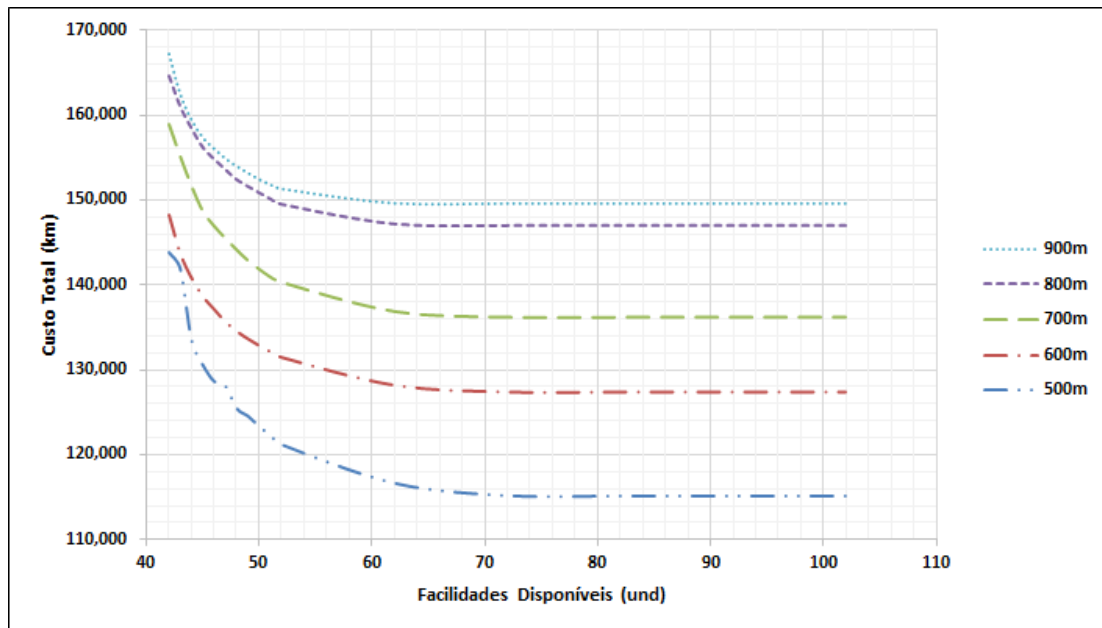


Figura 4.17: Cenário 02 - Variação do custo total *versus* Viaturas disponíveis.

mesmo quando o número de viaturas disponíveis ultrapassa esse valor.

Os dados apresentados na tabela são referentes ao caso com restrição de 900 metros de distância entre os pontos candidatos à instalação, mas essa relação pode ser observada nos demais casos de restrição de distância, conforme Apêndice C.

Cenário 3

O Cenário 3 também foi desenvolvido para simular o estudo de caso baseado nos registros da cidade de Recife. O número de ocorrências em cada bairro sofreu alterações, mantendo-se o total de 392 ocorrências. Na aplicação das simulações para previsão do número de ocorrências, duas simulações tiveram resultado igual a mediana dos valores obtidos. Na aplicação do Cenário 2 foi aplicado a distribuição dos pontos representando os locais de ocorrências nos bairros utilizando um desses resultados. Nesse cenário foi utilizado o resultado de uma segunda simulação, com valor igual a mediana obtida com os resultados da simulação. Nessa segunda simulação, o número de ocorrências em cada bairro é alterada e em decorrência dessa nova distribuição, os pontos geográficos também foram reposicionados aleatoriamente. A utilização dessa nova distribuição busca averiguar o impacto das alterações dos locais de ocorrências no custo total de deslocamento.

Os números referentes aos pontos candidatos (Tabela 4.6) e ao número inicial de viatu-

Tabela 4.7: Viaturas Alocadas - Restrição 900m entre pontos candidatos (PLMP).

Viaturas								
Disponíveis	Alocadas no Períodos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
102	47	23	24	43	32	47	55	62
92	47	23	24	43	32	47	55	62
82	47	23	24	43	32	47	55	62
72	47	23	24	43	32	47	55	62
62	47	23	24	43	32	47	55	62
52	47	23	24	43	32	47	52	52
51	47	23	24	43	32	47	51	51
50	47	23	24	43	32	47	50	50
49	47	23	24	43	32	47	49	49
48	47	23	24	43	32	47	48	48
47	47	23	24	43	32	47	47	47
46	46	23	24	43	32	46	46	46
45	45	23	24	43	32	45	45	45
44	44	23	24	43	32	44	44	44
43	43	23	24	43	32	43	43	43
42	42	23	24	42	32	42	42	42

ras, obedecem a mesma lógica utilizada no Cenário 2. A Tabela 4.8 apresenta a distribuição das 392 ocorrências nos turnos. Também foram mantidos os 05 casos com restrições de distância entre os pontos candidatos à localização-alocação de viaturas e a capacidade de atendimento de cada viatura alocada.

Tabela 4.8: Ocorrências por turnos - Cenário 3.

Turnos	01	02	03	04	05	06	07	08
Ocorrências	57	25	32	46	53	48	66	65

Na Figura 4.18 são apresentados os resultados da simulação com o modelo PLMC. Considerando que este modelo busca determinar o raio ideal para cobertura de uma determinada ocorrência, iniciamos as simulações buscando o raio de cobertura para atendimento de 100% das ocorrências, independente dos caso de distância entre os pontos candidatos à

localização-alocação de viaturas.

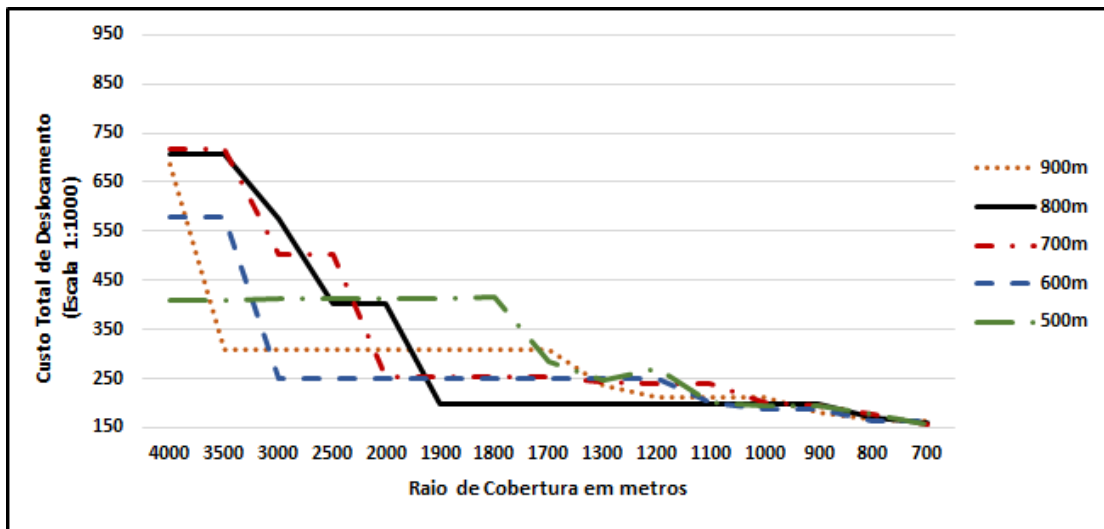


Figura 4.18: Custo Total Deslocamento \times Raio de Cobertura.

A Figura 4.19 mostra a variação no número das ocorrências atendidas em relação à variação no raio de cobertura. Neste cenário é possível afirmar que raios acima de 4.000 metros já garantem cobertura total das ocorrências. Neste cenário, a variação dos custos de deslocamento ocorre de forma mais lenta, mas também é possível identificar casos onde essa relação não segue um padrão, no que diz respeito a redução do custo total em relação a redução no raio de cobertura.

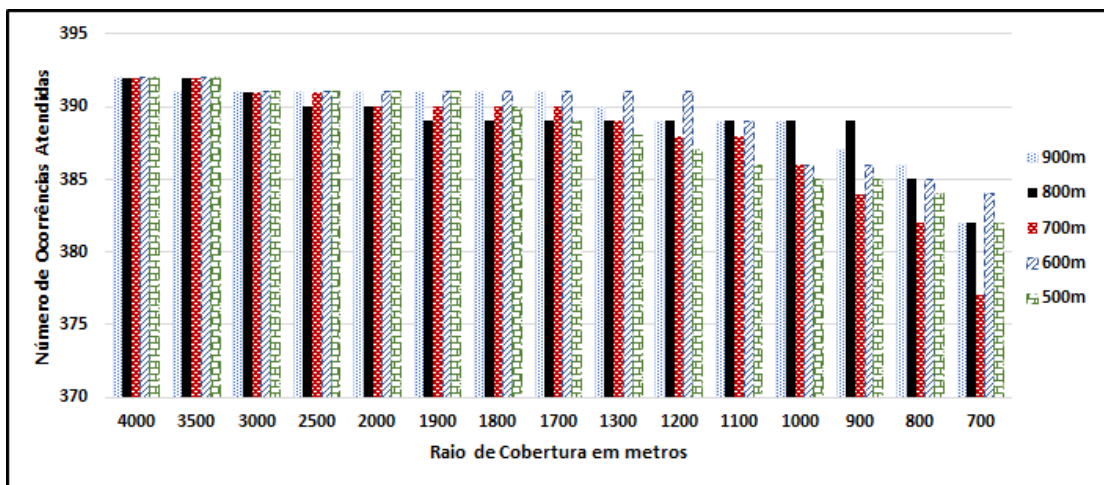


Figura 4.19: Ocorrências Atendidas \times Raio de Cobertura.

Quando analisado os valores referentes ao custo total de deslocamento, esse caso mostra-se melhor que os demais até que o raio de cobertura seja de 1900 metros, quando

o caso com restrição de 800 metros passa a apresentar melhores resultados, voltando a se apresentar como melhor opção nos casos com raio de cobertura abaixo de 1000 metros.

A Figura 4.20 mostra a influência da variação no raio de cobertura sobre o número de viaturas alocadas, já verificada no Cenário 02 e comprovada neste cenário, e ainda mostra uma maior frequência de casos com alocação de todas as viaturas disponíveis. As reduções no custo total ocorrem em pequenos valores, ultrapassando os 50% em apenas três momentos, no início dos casos com restrição de 900, 700 e 600 metros.

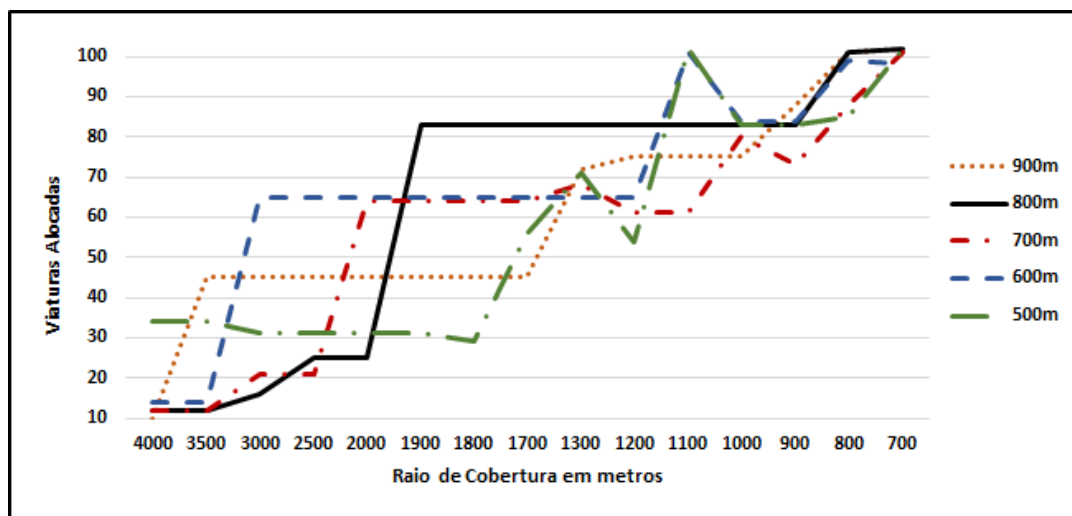


Figura 4.20: Viaturas Alocadas × Raio de Cobertura.

Os valores apresentados na Figura 4.21 são resultados da aplicação do modelo para o PLpMC. Todas as simulações com esse modelo foram realizadas no sentido de atender 100% das ocorrências. Nesse cenário, a redução aplicada no número de viaturas disponíveis, afeta diretamente o crescimento do custo total e do raio de cobertura. Foi possível simular essa redução até que fossem disponibilizadas apenas 25 viaturas, número diretamente relacionado a previsão do número de ocorrências e a capacidade de atendimento de cada instalação.

As simulações com o modelo PLpMC não encontraram solução viável em duas situações, nos casos em que as restrições de distância entre os pontos candidatos foram de 700 e 600 metros, com disponibilidade de 25 viaturas. Para restrição de distância de 500 metros com disponibilidade de 26 e 25 viaturas, foi observado um crescimento do custo total de deslocamento diferenciado das demais simulações, atingindo valores até seis vezes maiores (Figura 4.22).

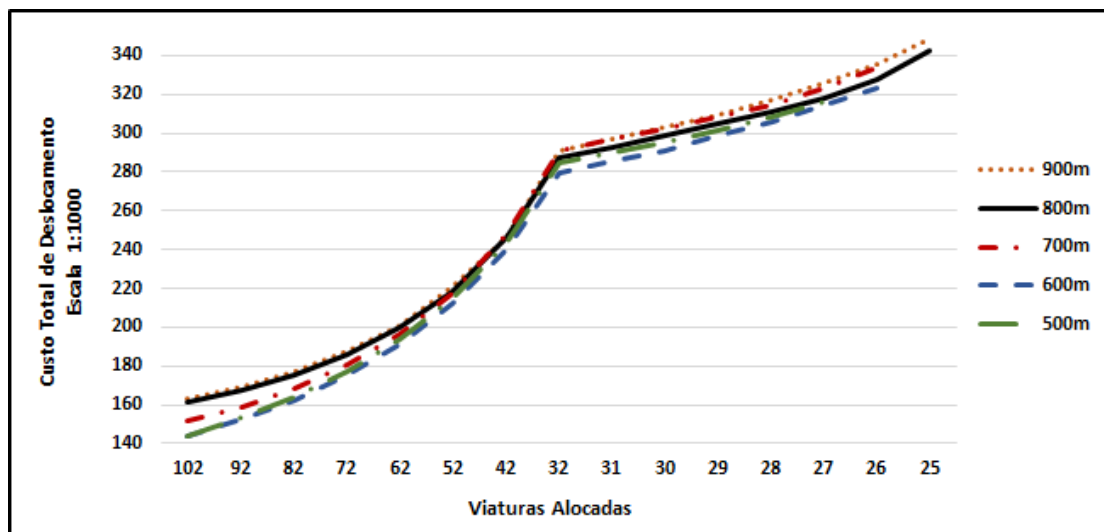


Figura 4.21: Custo Total de Deslocamento \times Viaturas Alocadas.

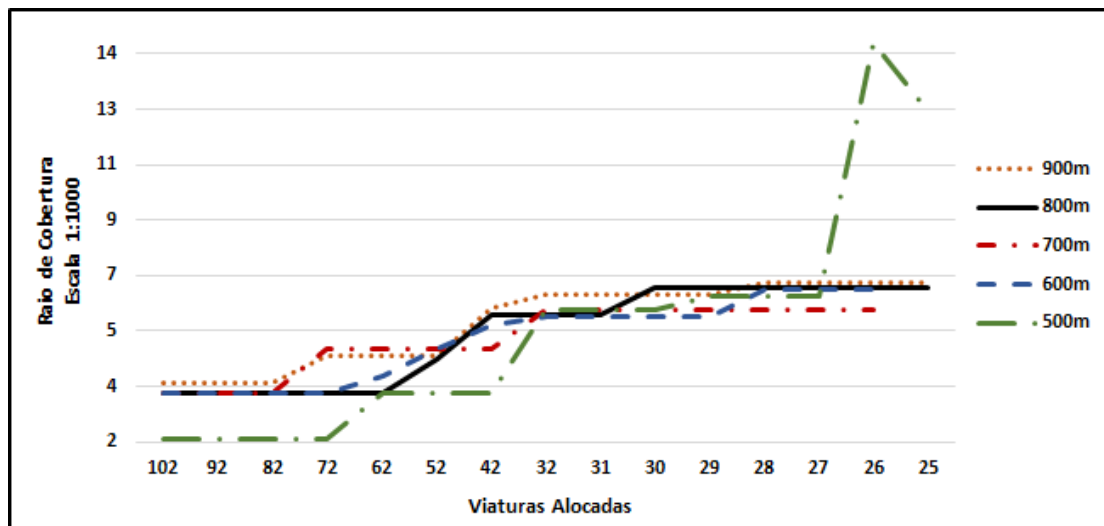


Figura 4.22: Raio de Cobertura \times Viaturas Alocadas.

O modelo PLMP aplicado ao Cenário 3 apresentou melhores resultados de custo total de deslocamento. Foram considerados os mesmos valores para os parâmetros de capacidade de atendimento por turno/período, 2 ocorrências por viaturas alocadas, e as simulações iniciaram com a disponibilidade de 102 viaturas, conforme descrito na Seção 4.4. A distribuição de ocorrências por turno/período utilizada nas simulações foi apresentada na Tabela 4.8 e as coordenadas dos locais de ocorrências foram geradas obedecendo esses números.

A aplicação do modelo PLMP apresentou resultados que comprovam a tendência já identificada nos resultados do Cenário 2, que mostram o aumento do custo total de deslocamento relacionado a redução no número de viaturas alocadas (Figura 4.23). Ainda é possível visualizar o crescimento do custo total de cada caso das restrições de distância entre

os pontos candidatos à localização-alocação de viaturas.

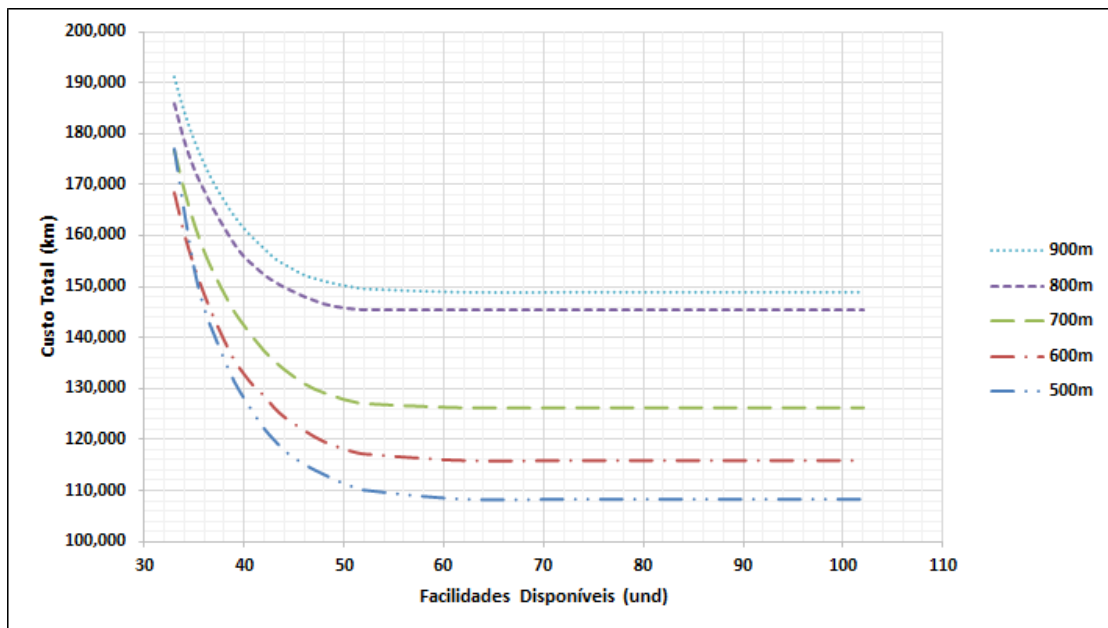


Figura 4.23: Cenário 03 - Variação do custo total *versus* Viaturas disponíveis.

A Tabela 4.9 apresenta os números de viaturas alocadas por turno/período. Observamos uma melhor alocação das viaturas, constatando-se a possibilidade de alocar no máximo 57 viaturas, quando a restrição de distância entre os pontos de alocação é 900 metros.

Tabela 4.9: (PLMP) Restrição 900m entre os pontos candidatos.

Viaturas								
Disponíveis	Instaladas no Períodos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
102	57	24	29	38	47	43	57	50
92	57	24	29	38	47	43	57	50
82	57	24	29	38	47	43	57	50
72	57	24	29	38	47	43	57	50
62	57	24	29	38	47	43	57	50
52	52	24	29	38	47	43	52	50
42	42	24	29	38	42	42	42	42
41	41	24	29	38	41	41	41	41
40	40	24	29	38	40	40	40	40
39	39	24	29	38	39	39	39	39
38	38	24	29	38	38	38	38	38
37	37	24	29	37	37	37	37	37
36	36	24	29	36	36	36	36	36
35	35	24	29	35	35	35	35	35
34	34	24	29	34	34	34	34	34
33	33	24	29	33	33	33	33	33

Capítulo 5

Conclusões

Neste capítulo revisamos as ideias centrais adotadas no desenvolvimento desse estudo. Apresentamos as conclusões sobre a utilização dos modelos aplicados aos cenários propostos e sobre resultados obtidos. Destacamos os pontos positivos e indicamos pontos que devem ser observados em estudos futuros.

Contribuições e limitações do trabalho

A realização deste trabalho foi motivada pela necessidade de uma ferramenta de apoio aos gestores do serviço de patrulhamento, no sentido de contribuir com de localização-alocação de viaturas policiais. O objetivo foi apresentar um modelo matemático e implementar esse modelo em uma ferramenta capaz de gerar cenários para auxiliar gestores na tomada de decisão para localização-alocação de viaturas em centros urbanos. Neste mesmo sentido, trabalhar modelos básicos adicionais, de tal forma a complementar o modelo apresentado como solução principal.

As bases de dados das PMs foram importantes para construir uma relação com os cenários reais do problema. No entanto, ainda é necessária a realização de estudos para uma melhor previsão dos pontos de ocorrências e de pontos ótimos candidatos à localização-alocação de viaturas. É importante enfatizar que os resultados mostram que o uso do modelo proposto pode ser considerado viável, desde que os parâmetros de entrada possam ser obtidos com maior precisão. Não tivemos acesso ao endereço das ocorrências, apenas nos foi disponibilizado o bairro. Com a definição dos locais poderiam ser realizados estudos para

definir os pontos com maior incidência e assim distribuir maior número de viaturas no local.

No Cenário 1, que foi aplicado com dados do município de Caicó-RN, os resultados da aplicação com o modelo proposto apresentou bons números no tocante ao custo total de deslocamento, apesar de ter limitado a aplicação ao número mínimo de 04 viaturas. Respeitado as distinções nos objetivos de cada modelo implementado, a ferramenta mostrou-se eficiente para utilização nesse cenário, por propiciar a simulação de cenários quando se busca a redução nos custos totais de deslocamento, desde que atendido o número de viaturas necessárias ao atendimento. Apesar de buscar objetivos distintos do modelo proposto, a implementação dos modelos básicos, se mostraram importantes, por possibilitar a simulação em cenários com até 01 viatura, atendendo os objetivos específicos de cada modelo.

Nos Cenários 2 e 3, aplicados com dados do município de Recife-PE, foram realizadas reduções no número de pontos candidatos à alocação de viaturas. Essas reduções ocorreram de acordo com a definição de uma restrição de distâncias entre estes pontos. Nesses cenários, a análise dos resultados mostrou que a alteração nas restrições de distância entre os pontos candidatos à alocação de viaturas impacta diretamente no custo total de deslocamento e no número de viaturas alocadas.

A representação de dois cenários, com distinções em relação aos pontos candidatos à alocação de viaturas e aos pontos de ocorrências, mostram que a ferramenta proposta apresenta de forma clara e eficiente, os resultados com a aplicação dos modelos. Estes resultados, embora baseados em simulações, propiciam aos gestores do serviço de patrulhamento, uma análise prévia dos números referentes aos custos de deslocamento e de viaturas alocadas.

Com o modelo PLMP foi possível otimizar os valores referentes ao custo total de deslocamento, assim como o número de viaturas alocadas. Tomando como base que um dos pontos considerados foi a limitação de capacidade de atuação das equipes (viaturas), e a busca pela redução nos custos de deslocamento, baseado no desempenho na localização-alocação destas, o modelo PLMP se destaca por garantir que, mesmo nas situações que uma ocorrência seja obrigada a esperar finalização do atendimento a outra, essa fila não ultrapassará uma ocorrência por turno/período. Po buscarem objetivos distintos, com o uso dos demais modelos básicos não é possível determinar a ordem e o tempo de espera, e em um deles nem a garantia de atendimento.

Nos casos dos Cenários 2 e 3, os modelos básicos apresentam resultados satisfatórios se

observados seus os objetivos particulares. O modelo aplicado ao PLMC mostrou-se eficiente no que diz respeito a cobertura máxima das ocorrências, embora que para atender 100% tenha sido necessário estabelecer um raio de cobertura acima de 4.000 metros em alguns casos. Se observados os valores de custo total de deslocamento, mesmo em situações na qual permiti-se que as ocorrências não seja totalmente atendidas, mostrando que esse modelo não deve ser utilizado como modelo principal quando os objetivos incluïrem a minimização de custos de deslocamento.

O modelo PLpMC apresentou-se como opção de solução aos gestores, desde que estes não busquem como objetivo principal a redução nos custos de deslocamento, mas sim a definição dos pontos adequados para localização-alocação das viaturas, buscando sempre atender 100% das ocorrências, considerando uma capacidade limitada de atendimento para cada equipe (viatura). Embora não tenha como objetivo principal a redução nos custos de deslocamento, em alguns casos apresentou resultados condizentes quando aplicado a redução no número de viaturas disponíveis.

A ferramenta com o modelo proposto como solução para os gestores do serviço de patrulhamento, apresentou resultados satisfatórios no tocante aos objetivos elencados para este estudo. Com sua ajuda, os gestores poderão facilmente operar uma interface gráfica, alterando o valores de variáveis consideradas importantes, sendo possível aos mesmos analisar previamente os impactos dessas modificações.

Trabalhos futuros

A abordagem adotada apresentou resultados satisfatórios diante do problema estudado, mas ficou no campo da simulação, por não ter sido possível a aplicação em cenário com todos os dados reais. A aplicação dos modelos estudados em um cenário real possibilitará a comparação e uma melhor análise dos resultados obtidos neste trabalho e a comprovação da eficiência como solução para o problema abordado.

Diante das dificuldades enfrentadas, foi possível identificar a necessidade de estudos que contribuam com acurácia na previsão do número de ocorrências, facilitando a definição dos pontos que as representem e de técnicas para definição dos pontos candidatos à localização-alocação de viaturas, que foram gerados aleatoriamente.

É importante a realização de estudos que envolvam análises sobre custos computacionais, que não foram objeto de estudos nessa pesquisa. Por fim, a realização de um trabalho que busque identificar uma heurística para tratar a dinâmica no surgimento de ocorrências, que nesse trabalho foram gerados utilizando técnicas de simulação.

Referências Bibliográficas

- [1] Nicole Adler, Alfred Shalom Hakkert, Jonathan Kornbluth, Tal Raviv, and Mali Sher. Location-allocation models for traffic police patrol vehicles on an interurban network. *Annals of Operations Research*, 221(1):9–31, 2014.
- [2] Hamid Afshari and Qingjin Peng. Challenges and solutions for location of healthcare facilities. *Industrial Engineering and Management*, 3(2):1–12, 2014.
- [3] Marcos Arenales, Vinicius Armentano, and Reinaldo Morabito. *Pesquisa operacional: para cursos de engenharia*. Elsevier Brasil, 2007.
- [4] Ronald H Ballou. *Gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial*. Bookman, 2001.
- [5] Claudio Beato, BFA da Silva, and Ricardo Tavares. Crime e estratégias de policiamento em espaços urbanos. *Revista de Ciências Sociais*, 51(3):687–717, 2008.
- [6] Patrícia Belfiore and Luiz Paulo Fávero. *Pesquisa Operacional para cursos de Engenharia*, volume 1. Elsevier Brasil, 2013.
- [7] Comunidade QGIS Brasil. Qgis brasil. <http://http://qgisbrasil.org/>. Acessado em: 2017-03-15.
- [8] Jordi Castro, Stefano Nasini, and Francisco Saldanha-da Gama. A cutting-plane approach for large-scale capacitated multi-period facility location using a specialized interior-point method. *Mathematical programming*, 163(1-2):411–444, 2017.
- [9] Giovanna Altomare CATÃO and Carlos Eduardo SARTOR. O uso da tecnologia sig na análise das desigualdades socioespaciais na metrópole do rio de janeiro. *Trabalho apresentado na GIS Brasil*, 2001.

- [10] Richard Church and Charles R Velle. The maximal covering location problem. *Papers in regional science*, 32(1):101–118, 1974.
- [11] Richard L Church. Geographical information systems and location science. *Computers & Operations Research*, 29(6):541–562, 2002.
- [12] Kevin M Curtin, Karen Hayslett-McCall, and Fang Qiu. Determining optimal police patrol areas with maximal covering and backup covering location models. *Networks and Spatial Economics*, 10(1):125–145, 2010.
- [13] R DANDREA. Análise de um modelo matemático de localização na reorganização de uma rede logística estabelecida. Master’s thesis, Universidade Federal do Espírito Santo, 2011.
- [14] Mark S Daskin. *Network and discrete location: models, algorithms, and applications*. John Wiley & Sons, 1995.
- [15] Mark S Daskin and Latoya K Dean. Location of health care facilities. In *Operations research and health care*, pages 43–76. Springer, 2005.
- [16] Google Developers. Places api web service. <https://developers.google.com/places/web-service/usage>. Acessado em: 2015-06-25.
- [17] IBGE Disponível. Ibge, municípios. <http://cidades.ibge.gov.br>. Acessado em: 2017-02-03.
- [18] Polícia Militar do Estado de Minas Gerais. Polícia militar de mg - o que é polícia ostensiva? <https://www.policiamilitar.mg.gov.br/portal-pm/4ciaesp/conteudo.action?conteudo=851&tipoConteudo=itemMenu>, 2016. Online; Acessado em: 19/02/2016.
- [19] Polícia Militar do Estado de Pernambuco. Polícia militar do pe. <http://www.pm.pe.gov.br/web/pmpe/unidades>. Acessado em: 2017-02-03.
- [20] Polícia Militar do Estado do Rio Grande do Norte. Polícia militar do rn. <https://www.pm.rn.gov.br>. Acessado em: 2017-02-03.
- [21] J Ronald EASTMAN. Manual do usuário-idrisi for windows versão 2. *Porto Alegre: UFRGS*, 1998.

- [22] Thayse Ferrari and Carlos David Nassi. Análise comparativa dos métodos de alocação para localização de postos de despacho de ambulâncias de resgate. In *XIII Rio de Transportes, Rio de Janeiro - RJ, Brasil*, 2015.
- [23] Gamini Gunawardane. Dynamic versions of set covering type public facility location problems. *European Journal of Operational Research*, 10(2):190–195, 1982.
- [24] André Morais Gurgel. Melhoria da segurança pública: uma proposta para alocação de unidades policiais utilizando o modelo das p-medianas e do caixeiro viajante. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.
- [25] S Louis Hakimi. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations research*, 12(3):450–459, 1964.
- [26] John Hammersley. *Monte carlo methods*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [27] Vladimir Marianov and Charles ReVelle. Siting emergency services. *Facility Location: a survey of applications and methods*, 1:199–223, 1995.
- [28] Vinícius R Máximo, Mariá CV Nascimento, and André CPLF Carvalho. Intelligent-guided adaptive search for the maximum covering location problem. *Computers & Operations Research*, 78:129–137, 2017.
- [29] M Teresa Melo, Stefan Nickel, and Francisco Saldanha-Da-Gama. Facility location and supply chain management—a review. *European journal of operational research*, 196(2):401–412, 2009.
- [30] Joice Kelli Menegarde, Cristiane Teixeira Barbosa, Diego Alberto Vila, Roberto Carmassio, and Luis Henrique Nogueira Marinho. Previsão de demanda por meio do método de simulação de monte carlo em uma engarrafadora de bebidas: estudo de caso. In *IV Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial, Campo Mourão - PR, Brasil*, 2010.
- [31] Daniel Augusto Moreira. *Pesquisa operacional-curso introdutório*. Cengage Learning Edições Ltda., 2010.
- [32] AS Nanni, L Descovi Filho, MA Virtuoso, D Montenegro, G Willrich, PH Machado, R Sperb, GS Dantas, and Y Calazans. Quantum gis—guia do usuário, versão 1.7. 4. “wro-claw”. *Manual [WWW document]*. URL <http://qgisbrasil.org> [accessed on 15 março 2015], 2002.

- [33] PHD Oliveira, NR Barros, and SG Reis. Aplicabilidade do método de simulação de monte carlo na previsão dos custos de produção de companhias industriais: O caso da companhia vale do rio doce. In *7º Congresso USP Controladoria e Contabilidade*, 2007.
- [34] Susan Hesse Owen and Mark S Daskin. Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research*, 111(3):423–447, 1998.
- [35] Charles Revelle, David Marks, and Jon C Liebman. An analysis of private and public sector location models. *Management Science*, 16(11):692–707, 1970.
- [36] Brian D Ripley. *Stochastic simulation*, volume 316. John Wiley & Sons, 2009.
- [37] RS Rosa, ACL SILVA, F KONOWALENKO, and PF BENEVIDES. Aplicação de p-medianas para atendimento aos colégios estaduais por viaturas do batalhão de patrulha escolar. In *I Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Ponta Grossa-Pr, Brasil*, 2011.
- [38] Güvenç Şahin and Haldun Süral. A review of hierarchical facility location models. *Computers & Operations Research*, 34(8):2310–2331, 2007.
- [39] Yue Sha and Jun Huang. The multi-period location-allocation problem of engineering emergency blood supply systems. *Systems Engineering Procedia*, 5:21–28, 2012.
- [40] Valtania Ferreira da Silva et al. Problema de alocação de viaturas policiais: estudo de caso na cidade de João Pessoa-PB. Master's thesis, Universidade Federal da Paraíba, Disponível em: <http://tede.biblioteca.ufpb.br:8080/handle/tede/5264>, 2014.
- [41] Pang-Ning Tan, Michael Steinbach, and Vipin Kumar. *Introdução ao datamining: mineração de dados*. Ciência Moderna, 2009.
- [42] Constantine Toregas, Ralph Swain, Charles ReVelle, and Lawrence Bergman. The location of emergency service facilities. *Operations Research*, 19(6):1363–1373, 1971.
- [43] Wilson Odirley Valla. Doutrina de emprego de polícia militar e bombeiro militar. *Curitiba: Associação da Vila Militar-Publicações Técnicas*, 1, 1999.
- [44] Amit Kumar Vatsa. Multi-period facility location problem with an uncertain number of servers. *Research and Publications*, 2014.
- [45] Wayne L Winston and Jeffrey B Goldberg. *Operations research: applications and algorithms*, volume 3. Duxbury press Boston, 2004.

Apêndice A

Bairros do Município de Caicó

1. Acampamento
 2. Adjunto Dias
 3. Alto da Boa Vista
 4. Barra Nova
 5. Boa Passagem
 6. Canuto e Filhos
 7. Castelo Branco
 8. Centro
 9. Darcy Fonseca
 10. Distrito Industrial
 11. Frei Damião
 12. Itans
 13. Jardim Satélite - IPE
 14. João Paulo II
 15. João XXIII
 16. Maynard
 17. Nova Caicó
 18. Nova Descoberta
 19. Paraíba
 20. Paulo VI
 21. Penedo
 22. Recreio
 23. Salviano Santos
 24. Samanaú
 25. Santa Clara
 26. Santa Costa
 27. Serrote Branco
 28. Soledade
 29. Vila Altiva
 30. Vila do Príncipe
 31. Walfredo Gurgel
- Distrito de Laginhas
 - Distrito da Palma
 - Distrito Perímetro Irrigado Itans-Sabugi

Apêndice B

Custo Total, Ocorrência Atendida e
Viaturas Alocadas *versus* Raio de
Cobertura - Cenário 02

B. Custo Total, Ocorrência Atendida e Viaturas Alocadas *versus* Raio de Cobertura - Cenário 02

Tabela B.1: Custo total, Ocorrência atendida e Viaturas alocadas *versus* Raio de cobertura (Cenário 2 - PLMC).

Raio de Cobertura	Restrição de distância entre os pontos candidatos																													
	900 metros						800 metros						700 metros						600 metros						500 metros					
	Custo	Raio	Ocorr	V	Custo	V	Custo	Raio	Ocorr	V	Custo	V	Custo	Raio	Ocorr	V	Custo	V	Custo	Raio	Ocorr	V	Custo	V	Custo	Raio	Ocorr	V	Custo	V
Definido	796.327	4.354	392	8	733.347	3.275	392	11	770.928	3.997	392	09	836.943	3.952	392	08	935.572	4.610	392	06										
+5000	796.327	4.354	392	8	733.347	3.275	392	11	770.928	3.997	392	09	836.943	3.952	392	08	935.572	4.610	392	06										
4500	383.123	1.792	391	28	733.347	3.275	392	11	770.928	3.997	392	09	836.943	3.952	392	08	935.572	4.610	392	06										
4000	383.123	1.792	391	28	733.347	3.275	392	11	770.928	3.997	392	09	836.943	3.952	392	08	935.572	4.610	392	06										
3500	383.123	1.792	391	28	733.347	3.275	392	11	270.747	1.415	391	59	420.720	1.872	391	28	335.825	1.786	391	43										
3000	383.123	1.792	391	28	304.852	1.597	391	50	270.747	1.415	391	59	420.720	1.872	391	28	335.825	1.786	391	43										
2000	383.123	1.792	391	28	304.852	1.597	391	50	270.747	1.415	391	59	420.720	1.872	391	28	335.825	1.786	391	43										
1800	383.123	1.792	391	28	304.852	1.597	391	50	270.747	1.415	391	59	281.945	1.473	390	64	335.825	1.786	391	43										
1700	211.173	970	389	76	304.852	1.597	391	50	270.747	1.415	391	59	281.945	1.473	390	64	276.348	1.461	390	65										
1500	211.173	970	389	76	268.540	1.278	389	49	270.747	1.415	391	59	281.945	1.473	390	64	276.348	1.461	390	65										
1400	211.173	970	389	76	268.540	1.278	389	49	273.802	1.309	390	53	290.517	1.372	389	62	245.319	1.261	389	70										
1300	211.173	970	389	76	268.540	1.278	389	49	265.331	1.214	389	60	183.665	767	388	90	245.319	1.261	389	70										
1200	211.173	970	389	76	208.601	893	388	75	226.013	955	388	64	183.665	767	388	90	238.850	1.028	388	65										
1100	211.173	970	389	76	208.601	893	388	75	226.013	955	388	64	183.665	767	388	90	207.499	997	387	83										
1000	211.173	970	389	76	208.601	893	388	75	226.013	955	388	64	183.665	767	388	90	207.499	997	387	83										
900	182.993	802	386	89	208.601	893	388	75	211.811	893	387	77	183.665	767	388	90	207.499	997	387	83										
800	173.259	762	385	95	183.665	757	387	93	180.659	776	381	91	183.665	767	388	90	189.966	778	383	87										
700	153.675	698	376	102	163.637	699	381	101	155.768	688	373	102	169.650	680	386	102	167.503	699	391	96										

Apêndice C

Alocação de Viaturas Por Períodos

Tabela C.1: Cenário 2 - Restrição 900m entre os pontos candidatos

Viaturas								
Disponíveis	Instaladas no Períodos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
102	47	23	24	43	32	47	55	62
92	47	23	24	43	32	47	55	62
82	47	23	24	43	32	47	55	62
72	47	23	24	43	32	47	55	62
62	47	23	24	43	32	47	55	62
52	47	23	24	43	32	47	52	52
51	47	23	24	43	32	47	51	51
50	47	23	24	43	32	47	50	50
49	47	23	24	43	32	47	49	49
48	47	23	24	43	32	47	48	48
47	47	23	24	43	32	47	47	47
46	46	23	24	43	32	46	46	46
45	45	23	24	43	32	45	45	45
44	44	23	24	43	32	44	44	44
43	43	23	24	43	32	43	43	43
42	42	23	24	42	32	42	42	42

Tabela C.2: Cenário 2 - Restrição 800m entre os pontos candidatos

Viaturas								
Disponíveis	Instaladas no Períodos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
102	54	23	23	40	33	48	55	69
92	54	23	23	40	33	48	55	69
82	54	23	23	40	33	48	55	69
72	54	23	23	40	33	48	55	69
62	54	23	23	40	33	48	55	62
52	52	23	23	40	33	48	52	52
51	51	23	23	40	33	48	51	51
50	50	23	23	40	33	48	50	50
49	49	23	23	40	33	48	49	49
48	48	23	23	40	33	48	48	48
47	47	23	23	40	33	47	47	47
46	46	23	23	40	33	46	46	46
45	45	23	23	40	33	45	45	45
44	44	23	23	40	33	44	44	44
43	43	23	23	40	33	43	43	43
42	42	23	23	40	33	42	42	42

Tabela C.3: Cenário 2 - Restrição 700m entre os pontos candidatos

Viaturas								
Disponíveis	Instaladas no Períodos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
102	54	21	22	47	36	49	55	67
92	54	21	22	47	36	49	55	67
82	54	21	22	47	36	49	55	67
72	54	21	22	47	36	49	55	67
62	54	21	22	47	36	49	55	62
52	52	21	22	47	36	49	52	52
51	51	21	22	47	36	49	51	51
50	50	21	22	47	36	49	50	50
49	49	21	22	47	36	49	49	49
48	48	21	22	47	36	48	48	48
47	47	21	22	47	36	47	47	47
46	46	21	22	46	36	46	46	46
45	45	21	22	45	36	45	45	45
44	44	21	22	44	36	44	44	44
43	43	21	22	43	36	43	43	43
42	42	21	22	42	36	42	42	42

Tabela C.4: Cenário 2 - Restrição 600m entre os pontos candidatos

Viaturas								
Disponíveis	Instaladas no Períodos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
102	54	21	24	45	34	48	53	70
92	54	21	24	45	34	48	53	70
82	54	21	24	45	34	48	53	70
72	54	21	24	45	34	48	53	70
62	54	21	24	45	34	48	53	62
52	52	21	24	45	34	48	52	52
51	51	21	24	45	34	48	51	51
50	50	21	24	45	34	48	50	50
49	49	21	24	45	34	48	49	49
48	48	21	24	45	34	48	48	48
47	47	21	24	45	34	47	47	47
46	46	21	24	45	34	46	46	46
45	45	21	24	45	34	45	45	45
44	44	21	24	44	34	44	44	44
43	43	21	24	43	34	43	43	43
42	42	21	24	42	34	42	42	42

Tabela C.5: Cenário 2 - Restrição 500m entre os pontos candidatos

Viaturas								
Disponíveis	Instaladas no Períodos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
102	54	22	23	49	37	48	55	73
92	54	22	23	49	37	48	55	73
82	54	22	23	49	37	48	55	73
72	54	22	23	49	37	48	55	73
62	54	22	23	49	37	48	55	62
52	52	22	23	49	37	48	52	52
51	51	22	23	49	37	48	51	51
50	50	22	23	49	37	48	50	50
49	49	22	23	49	37	48	49	49
48	48	22	23	48	37	48	48	48
47	47	22	23	47	37	47	47	47
46	46	22	23	46	37	46	46	46
45	45	22	23	45	37	45	45	45
44	44	22	23	44	37	44	44	44
43	43	22	23	43	37	43	43	43
42	42	22	23	42	37	42	42	42

Tabela C.6: Cenário 3 - Restrição 900m entre os pontos candidatos

Viaturas								
Disponíveis	Instaladas no Períodos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
102	57	24	29	38	47	43	57	50
92	57	24	29	38	47	43	57	50
82	57	24	29	38	47	43	57	50
72	57	24	29	38	47	43	57	50
62	57	24	29	38	47	43	57	50
52	52	24	29	38	47	43	52	50
51	51	24	29	38	47	43	51	50
50	50	24	29	38	47	43	50	50
49	49	24	29	38	47	43	49	49
48	48	24	29	38	47	43	48	48
47	47	24	29	38	47	43	47	47
46	46	24	29	38	46	43	46	46
45	45	24	29	38	45	43	45	45
44	44	24	29	38	44	43	44	44
43	43	24	29	38	43	43	43	43
42	42	24	29	38	42	42	42	42
41	41	24	29	38	41	41	41	41
40	40	24	29	38	40	40	40	40
39	39	24	29	38	39	39	39	39
38	38	24	29	38	38	38	38	38
37	37	24	29	37	37	37	37	37
36	36	24	29	36	36	36	36	36
35	35	24	29	35	35	35	35	35
34	34	24	29	34	34	34	34	34
33	33	24	29	33	33	33	33	33

Tabela C.7: Cenário 3 - Restrição 800m entre os pontos candidatos

Viaturas								
Disponíveis	Instaladas no Períodos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
102	49	23	31	38	44	42	53	50
92	49	23	31	38	44	42	53	50
82	49	23	31	38	44	42	53	50
72	49	23	31	38	44	42	53	50
62	49	23	31	38	44	42	53	50
52	49	23	31	38	44	42	52	50
51	49	23	31	38	44	42	51	50
50	49	23	31	38	44	42	50	50
49	49	23	31	38	44	42	49	49
48	48	23	31	38	44	42	48	48
47	47	23	31	38	44	42	47	47
46	46	23	31	38	44	42	46	46
45	45	23	31	38	44	42	45	45
44	44	23	31	38	44	42	44	44
43	43	23	31	38	43	42	43	43
42	42	23	31	38	42	42	42	42
41	41	23	31	38	41	41	41	41
40	40	23	31	38	40	40	40	40
39	39	23	31	38	39	39	39	39
38	38	23	31	38	38	38	38	38
37	37	23	31	37	37	37	37	37
36	36	23	31	36	36	36	36	36
35	35	23	31	35	35	35	35	35
34	34	23	31	34	34	34	34	34
33	33	23	31	33	33	33	33	33

Tabela C.8: Cenário 3 - Restrição 700m entre os pontos candidatos

Viaturas								
Disponíveis	Instaladas no Períodos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
102	51	23	30	43	45	45	58	55
92	51	23	30	43	45	45	58	55
82	51	23	30	43	45	45	58	55
72	51	23	30	43	45	45	58	55
62	51	23	30	43	45	45	58	55
52	52	23	30	43	45	45	52	52
51	51	23	30	43	45	45	51	51
50	50	23	30	43	45	45	50	50
49	49	23	30	43	45	45	49	49
48	48	23	30	43	45	45	48	48
47	47	23	30	43	45	45	47	47
46	46	23	30	43	45	45	46	46
45	45	23	30	43	45	45	45	45
44	44	23	30	43	44	44	44	44
43	43	23	30	43	43	43	43	43
42	42	23	30	42	42	42	42	42
41	41	23	30	41	41	41	41	41
40	40	23	30	40	40	40	40	40
39	39	23	30	39	39	39	39	39
38	38	23	30	38	38	38	38	38
37	37	23	30	37	37	37	37	37
36	36	23	30	36	36	36	36	36
35	35	23	30	35	35	35	35	35
34	34	23	30	34	34	34	34	34
33	33	23	30	33	33	33	33	33

Tabela C.9: Cenário 3 - Restrição 600m entre os pontos candidatos

Viaturas								
Disponíveis	Instaladas no Períodos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
102	51	24	31	39	47	42	58	57
92	51	24	31	39	47	42	58	57
82	51	24	31	39	47	42	58	57
72	51	24	31	39	47	42	58	57
62	51	24	31	39	47	42	58	57
52	51	24	31	39	47	42	52	52
51	51	24	31	39	47	42	51	51
50	50	24	31	39	47	42	50	50
49	49	24	31	39	47	42	49	49
48	48	24	31	39	47	42	48	48
47	47	24	31	39	47	42	47	47
46	46	24	31	39	46	42	46	46
45	45	24	31	39	45	42	45	45
44	44	24	31	39	44	42	44	44
43	43	24	31	39	43	42	43	43
42	42	24	31	39	42	42	42	42
41	41	24	31	39	41	41	41	41
40	40	24	31	39	40	40	40	40
39	39	24	31	39	39	39	39	39
38	38	24	31	38	38	38	38	38
37	37	24	31	37	37	37	37	37
36	36	24	31	36	36	36	36	36
35	35	24	31	35	35	35	35	35
34	34	24	31	34	34	34	34	34
33	33	24	31	33	33	33	33	33

Tabela C.10: Cenário 3 - Restrição 500m entre os pontos candidatos

Viaturas								
Disponíveis	Instaladas no Períodos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
102	52	25	30	42	46	45	60	56
92	52	25	30	42	46	45	60	56
82	52	25	30	42	46	45	60	56
72	52	25	30	42	46	45	60	56
62	52	25	30	42	46	45	60	56
52	52	25	30	42	46	45	52	52
51	51	25	30	42	46	45	51	51
50	50	25	30	42	46	45	50	50
49	49	25	30	42	46	45	49	49
48	48	25	30	42	46	45	48	48
47	47	25	30	42	46	45	47	47
46	46	25	30	42	46	45	46	46
45	45	25	30	42	45	45	45	45
44	44	25	30	42	44	44	44	44
43	43	25	30	42	43	43	43	43
42	42	25	30	42	42	42	42	42
41	41	25	30	41	41	41	41	41
40	40	25	30	40	40	40	40	40
39	39	25	30	39	39	39	39	39
38	38	25	30	38	38	38	38	38
37	37	25	30	37	37	37	37	37
36	36	25	30	36	36	36	36	36
35	35	25	30	35	35	35	35	35
34	34	25	30	34	34	34	34	34
33	33	25	30	33	33	33	33	33

Apêndice D

Custo Total de Deslocamento e Raio
de Cobertura *versus* Viaturas
Alocadas - Cenário 02

Tabela D.1: Custo Total de Deslocamento e Raio de Cobertura *versus* Viaturas Alocadas (Cenário 2 - PLpMC).

Facilidades	900 metros		800 metros		700 metros		600 metros		500 metros	
	Custo	Raio de Cobertura	Custo	Raio de Cobertura	Custo	Raio de Cobertura	Custo	Raio de Cobertura	Custo	Raio de Cobertura
102	163.814	4.354	164.282	3.275	161.291	3.997	156.865	3.952	151.309	4.610
92	171.049	4.354	171.007	3.275	168.858	3.997	164.366	3.952	159.716	4.610
82	180.164	4.354	179.413	3.275	178.022	3.997	173.603	3.952	170.494	4.610
72	191.719	4.354	189.819	3.275	189.683	3.997	183.168	3.952	183.176	4.610
62	206.551	4.354	203.280	3.275	204.753	3.997	197.205	3.952	198.269	4.610
52	226.409	4.354	221.672	3.275	224.689	3.997	216.191	3.952	217.996	4.610
42	254.433	4.354	281.675	9.331	251.189	3.997	244.688	3.952	224.823	4.610
32	295.301	4.354	1.112.776	10.299	292.902	3.997	287.281	3.952	287.289	9.550
31	300.228	9.281	1.210.626	10.299	298.311	9.406	292.944	9.615	292.973	9.550
30	305.515	9.281	1.214.251	10.299	304.116	3.997	299.162	9.615	298.714	9.550
29	311.203	9.281	1.306.478	10.299	310.059	9.940	306.035	9.751	305.182	9.550
28	318.116	9.281	1.316.886	10.299	317.255	9.940	313.176	9.751	312.336	9.550
27	324.950	9.281	1.490.180	11.236	952.252	11.541	320.549	9.751	2.722.305	23.902
26	334.991	9.281	1.712.787	10.299	1.177.742	12.128	340.700	11.872	2.712.194	23.902
25	350.354	9.281	2.007.351	11.500	1.424.517	9.822	358.241	9.651	346.909	9.550

Apêndice E

Implementação do Modelo no AIMMS

Modelo Alocação-Localização de Facilidades Multi-período

Declaração inicial dos sets

Identifier: Turnos (T)

Description: Conjunto de períodos de tempo no horizonte de planejamento

Index: t

Identifier: Localizacoes (L)

Description: Conjunto de todas localizações do modelo

Index: l

Identifier: Bases_Policiais ($I \in L$)

Description: Conjunto de localizações candidatas a se tornar facilidades (viaturas)

Index: i

Identifier: Bairros ($J \in L$)

Description: Conjunto de regiões que agrupam as demandas de ocorrências

Index: j

Descrição dos parâmetros

Identifier: Distancia_Base_Ocorrencia (Custo)

Description: Distância (custo) da localização candidata i até o ponto de demanda j no período t

Index domain: $c_{i,j}^t$

Identifier: Demanda_Ocorrencia

Description: Demanda de ocorrências nos bairros j em cada período t

Index domain: d_j^t

Identifier: Capacidade_Bases

Description: Capacidade da facilidade i operar em cada período t

Index domain: q_i^t

Identifier: Facilidades (P)

Description: Número máximo de facilidades (viaturas) que podem operar em cada período t

Index domain: p^t

Descrição das variáveis

Identifier: Mediana

Description: Facilidade $i \in I$ operando em cada período t

Index domain: y_i^t

Range: binário

Identifier: Alocação

Description: Quantidade de facilidade i alocada para cada região j em cada período t

Index domain: $x_{i,j}^t$

Range: inteiro

Identifier: Funcao_Objetivo

Definition: $\text{sum}(t, \text{sum}((i,j), \text{Distancia_Base_Ocorrencia}(t,i,j) * \text{Alocacao}(t,i,j)))$

$$\text{Min} \sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{i,j}^t * x_{i,j}^t \right).$$

Descrição das restrições

Identifier: Restricao_Alocacao

Index domain: (t, j)

Definition: $\text{sum}(i, \text{Alocacao}(t,i,j)) = \text{Demanda_Ocorrencia}(t,j)$

$$\sum_{i \in I} x_{ij}^t = d_j^t \quad \forall j \in J, \quad \forall t \in T.$$

Identifier: Restricao_Capacidade

Index domain: (t, i)

Definition: $\text{sum}(j, \text{Alocacao}(t,i,j)) \leq \text{Capacidade_Bases}(t,i) * \text{Mediana}(t,i)$

$$\sum_{j \in J} x_{ij}^t \leq q_i^t * y_i^t \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T.$$

Identifier: Restricao_P

Index domain: (t)

Definition: $\text{sum}(i, \text{Mediana}(t,i)) \leq \text{Facilidades}(t)$

$$\sum_{i \in I} y_i^t \leq p^t \quad \forall t \in T.$$

Identifier: Integridade

Index domain: (t)

$$y_i^t \in \{0,1\},$$

$$x_{ij}^t \in \mathbb{Z}.$$

Descrição da Programação Matemática

Identifier: FO

Objective: Função Objetivo

Direction: minimize

Apêndice F

Autorização do Comando do 6º BPM



Rio Grande do Norte
Secretaria de Estado da Segurança
Pública e da Defesa Social
Polícia Militar
CPI - 6º BPM
"Batalhão Dinarte Mariz"

Rua Major Lula, nº 851, Bairro Paraiba, Caicó/RN, Fone: (84) 3421.6091

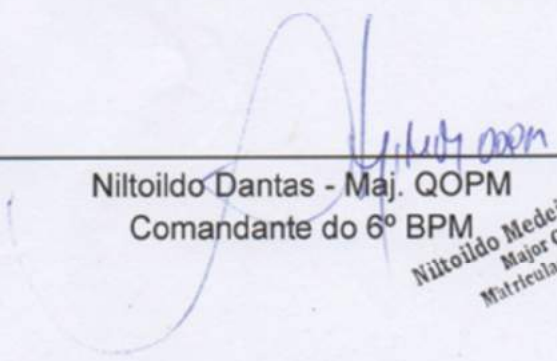
AUTORIZAÇÃO DE USO DE DADOS

O comando do 6º Batalhão de Polícia Militar – Senador Dinarte Mariz, abaixo assinado, declara para os devidos fins, que autoriza o pesquisador AMARILDO JEIELE FERREIRA DE LUCENA, cadastrado no Registro de Pessoas da Secretaria de Segurança Pública do Estado do Rio Grande do Norte sob número 1.620.675, e no Cadastro de Pessoa Física sob o número 007.676.824-40, o acesso aos dados de registros de ocorrências policiais desta unidade, para serem utilizados em pesquisa de sua autoria ou sob sua orientação, e que posteriormente terão seus resultados publicados em eventos e/ou revistas científicas da área, periódicos ou cadernos de resumos.

Esta autorização está condicionada ao cumprimento do (a) pesquisador (a) aos requisitos do Decreto Nº 7.724, de 16 de maio de 2012, que regulamenta a Lei Nº 12.527, de 18 de novembro de 2011 e suas complementares, comprometendo-se o mesmo a utilizar os dados pessoais dos sujeitos da pesquisa, exclusivamente para os fins científicos, mantendo o sigilo e garantindo a não utilização das informações em prejuízo das pessoas e/ou das comunidades. O pesquisador será responsável pela tutela dos dados coletados, que ficarão sob sua guarda durante o período necessário a realização da pesquisa, ficando o mesmo obrigado a apresentar declaração de responsabilidade emitida por terceiros, quando da participação dos mesmos nas pesquisas.

O pesquisador fica ainda obrigado a apresentar ao comando desta unidade, ou aqueles por ele indicado, o resultado das pesquisas realizadas, comprovando os benefícios a esta Unidade de Comando Militar, em contrapartida a cessão dos dados.

Caicó/RN, 30 de maio de 2016.


Niltoildo Dantas - Maj. QOPM
Comandante do 6º BPM

Niltoildo Medeiros Dantas
Major QOPM
Matrícula: 113479.5

Apêndice G

Autorização do Comando da SDS-PE



CENTRO INTEGRADO DE OPERAÇÕES DE DEFESA SOCIAL

CI. nº 575/2016 - CIODS/SDS
Ref.: CI nº 575/2016-Ouvidoria.

Recife-PE, 16 de dezembro de 2016.

Ilma. Sra.
EMANUELA SOUZA
MD. Ouvidora da Secretaria de Defesa Social
Nesta

Senhora Ouvidora,

Cumprimentando-a, cordialmente, e visando responder ao documento de referência, remeto a Vossa Senhoria documento solicitado.

Na oportunidade, reitero os sinceros e cordiais votos de elevada estima e distinto apreço, colocando esta Gerência Geral à disposição para os encargos que se fizerem necessários.

Cordialmente,

Vanildo Oliveira Guimarães Júnior
Ten Cel PM
Mat. 019925
RG nº 3437

VANILDO OLIVEIRA GUIMARÃES JÚNIOR – Ten Cel PM
Chefe Adjunto do CIODS

GMAG



SECRETARIA DE
DEFESA SOCIAL

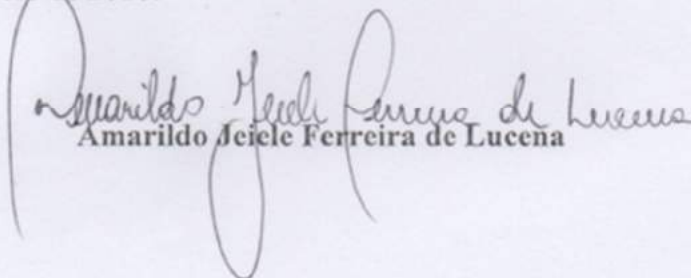
GOVERNO DO ESTADO
Pernambuco

OUVIDORIA

RECIBO

Eu, Amarildo Jeiele Ferreira de Lucena, declaro para os devidos fins que recebi da Autoridade Administrativa da Lei de Acesso à Informação junto à Secretaria de Defesa Social de Pernambuco uma mídia (CD) na qual constam planilhas com a resposta referente ao PAI nº 201689028.

Recife, 20 de dezembro de 2016.


Amarildo Jeiele Ferreira de Lucena