

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ÁREA DE ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANITÁRIA

**MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DA DISPOSIÇÃO ESPACIAL DE UNIDADES
DE RESERVAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO
GEOTECNOLOGIAS**

Maria José de Sousa Cordão

Campina Grande, PB.

2009

Maria José de Sousa Cordão

**MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DA DISPOSIÇÃO ESPACIAL DE UNIDADES
DE RESERVAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO
GEOTECNOLOGIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para a obtenção do Título de Mestre.

Área de concentração: Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária

Orientadora: Iana Alexandra Alves Rufino

Campina Grande, PB.

Março/2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C794m Cordão, Maria José de Sousa
2009 Modelagem e otimização da disposição espacial de unidades de
reservação em redes de distribuição de água utilizando geotecnologias /
Maria José de Sousa Cordão. Campina Grande, 2009.
115 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) –
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e
Recursos Naturais.

Referências.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Iana Alexandra Alves Rufino.

1. Recursos Hídricos 2. Geotecnologias 3. Planejamento e Reservatórios
de Água I. Título.

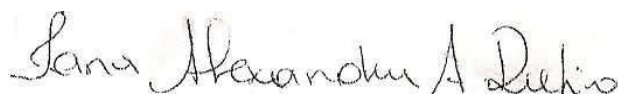
CDU - 556.38(043)

Maria José de Sousa Cordão

**MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DA DISPOSIÇÃO ESPACIAL DE UNIDADES
DE RESERVAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO
GEOTECNOLOGIAS**

Dissertação aprovada em 18 de Março de 2009

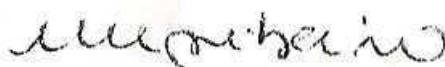
COMISSÃO EXAMINADORA



Iana Alexandra Alves Rufino

Orientador(a)

Unidade Acadêmica de Engenharia Civil – UFCG



Márcia Maria Rios Ribeiro

Examinador(a) interno

Unidade Acadêmica de Engenharia Civil – UFCG



Laudelino de Araújo Pedrosa Filho

Examinador(a) externo

Universidade Federal da Paraíba– UFPB

Campina Grande, PB.

Março/2009.

“A alegria do coração, eis a vida do homem. O sorriso, eis o que prolonga seus dias”.

Eclesiástico, 30-22.

Aos meus pais amados, Antônio e Terezinha.

As minhas queridas irmãs: Jô, Michelly, Dulce, Ana, Corrinha e Patrícia. Uma parte de cada uma formou o meu todo.

Agradecimentos

Meus agradecimentos a Deus, por conceder a presença inestimável de Seus anjos em meu caminho. Quando pensava que estava sozinha, uma luz resplandecia sobre mim. Era o Senhor a me guiar.

Minha enorme gratidão a professora e orientadora Iana Alexandra Alves Rufino. Pessoa mais amável e brilhante. Agradeço pelo conhecimento transmitido, tornando possível ponderar minha pouca experiência, pela dedicação e espírito de cooperação.

Aos professores, Janiro Costa Rego e Kennedy Flávio Meira de Lucena que transmitiram conhecimentos que muito contribuíram para a formação deste trabalho.

Aos professores Carlos de Oliveira Galvão, Márcia Maria Rios Ribeiro, Eduardo Eneas de Figueiredo, José Gomes da Silva, Rosires Catão Curi, Vajapeyam S. Srinivasan e Annemarie Konig, que além de mestres, tornaram-se amigos.

A CAGEPA, pelas informações disponibilizadas.

Aos meus colegas de turma: Sandra, Nilton, Ivonaldo, Daniela, Eduardo, Mirella, Emanuel, Thiago, Josicleide, apelidada de turma nota 10, não só pelos esforços intelectuais, mas também pelas grandes pessoas que se tornaram.

Aos meus grandes amigos: Sandra, Nilton, Ivonaldo, John e Heber, com quem compartilhei anseios e perspectivas, tristezas e alegrias. Tudo que desejo para minha vida, desejo em dobro para vocês.

A todos que fazem o laboratório de Hidráulica II. São tantos, mas certamente todos contribuíram de alguma forma com este trabalho. Os encontros nas pizzarias foram inesquecíveis, os aniversários, enfim, o nosso dia-a-dia será lembrado com muitas saudades.

A todos os funcionários do PPGECA, por todos os auxílios desempenhados.

A minha família, razão do meu ser, enquanto pessoa e profissional.

Ao meu querido Rêmulo, sua demasiada estima tem alegrado-me constantemente. Seu apoio constante é minha maior motivação.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de alguma maneira para a elaboração deste trabalho.

Sumário

Resumo	xi
Abstract	xii
Lista de Tabelas.....	xiii
Lista de Figuras	xiii
Listas de Abreviaturas	xx
Capítulo 1: Introdução	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Caracterização do problema.....	2
1.3 Objetivos	4
Capítulo 2: Fundamentação Teórica	5
2.1 Considerações gerais.....	5
2.2 Disposição espacial de equipamentos urbanos	6
2.2.1 Tipos de equipamentos	7
2.2.2 Caracterização dos elementos do problema	8
2.3 Planejamento de Sistemas Urbanos de Distribuição de Água.....	9
2.3.1 Expansão dos Sistemas Urbanos de Distribuição de Água.....	10
2.3.3 Unidades de Reservação	11
2.3.4 Disposição espacial das unidades de reservação.....	12
2.3.5 Simuladores hidráulicos e SIG.....	14
2.4 Modelagem e Otimização em Sistemas de Informações Geográficas	15
2.4.1 Funcionalidades na análise de dados em SIG	18
2.4.2 Modelos de dados espaciais	19
2.4.3 Aplicação dos SIG na modelagem e otimização dos SUDA	23
2.4.4 Avaliação multicriterial e tomada de decisão em SIG	25
2.4.4.1. Modelos baseados em conhecimento	26
2.4.4.2 Combinação Linear Ponderada.....	26
2.4.4.3 Normalização e Ponderação de Critérios.....	27
Capítulo 3: Metodologia	39
3.1 Considerações iniciais.....	39
3.2 Caso de estudo	29
3.2.1 Área de Estudo.....	29
3.2.1.1 Localização.....	29
3.2.1.2 Relevo	30

3.2.1.3 Demografia e Expansão Urbana	31
3.2.2 O Sistema Urbano de Distribuição de Água.....	33
3.3 Aquisição de dados	40
3.4 Modelagem Conceitual	41
3.4.1 Avaliação de critérios.....	42
3.4.1.1 Altimetria	43
3.4.1.2 Distâncias	43
3.4.1.3 Demandas.....	44
3.4.1.4 Volumes armazenados	44
3.4.2 Alternativas analisadas	45
3.5 Modelagem Espacial.....	46
3.5.1 Pré-processamento	47
3.5.2 Desenvolvimento do modelo.....	48
3.5.3 Implementação	52
Capítulo 4: Resultados e Discussões	74
4.1 Alternativa 1: Diagnóstico da situação atual.....	74
4.2 Alternativa 2: Simulação de zonas para localizar novas unidades.....	93
Capítulo 5: Considerações finais e sugestões	105
5.1 Considerações Finais.....	105
5.2 Sugestões e recomendações	107
Capítulo 6: Referências Bibliográficas.....	108

Resumo

A modelagem e otimização da disposição espacial de unidades de reservação que constituem os Sistemas Urbanos de Distribuição de Água (SUDA) são abordadas neste trabalho sob a perspectiva do apoio à decisão no planejamento desses sistemas. Estudos na área de Engenharia Hidráulica são realizados a partir de informações que constituem modelos, os quais, quando gerados em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) resultam em facilidades para a otimização de diversos aspectos relacionados aos SUDA. Tendo em vista os avanços e técnicas encontradas nos SIG e a possibilidade de utilizá-lo como Sistema de Apoio a Decisão Espacial (SADE), este trabalho apresenta uma metodologia que viabiliza a tomada de decisão em planejamento de SUDA. Neste sentido, são exploradas recursos de análise espacial presentes nos SIG. Utilizando critérios, são gerados mapas de riscos a desabastecimento em lotes urbanos que podem servir como indicadores em ações de planejamento e gestão, assim como, são mapeadas zonas consideradas como *ótimas* para a localização de novas unidades de reservação, as quais podem constituir diretrizes no planejamento para expansão dos SUDA.

Abstract

This research presents an alternative of modeling and optimizing of the placement of reservoirs units of an Urban Water Supply Systems (UWSS). These systems are studied under the perspective of the decision making support for planning of these systems. Studies in Hydraulic Engineering allied with Geographical Information Systems (GIS) can produce models that improve and optimize diverse aspects related with the water supply in urban areas. The focus is the advances and techniques found in the GIS and the possibility to use it as Spatial Decision Support System (SDSS). This research presents a new methodology for decision making in a planning of UWSS exploring the GIS spatial analysis tools. Using multi evaluation decision, it is produced unsupplied risks maps for urban parcels that can indicate some planning and management actions. It is mapped some zones considered as “the best choice” for locate new reservoirs units, which can support guidelines in the planning for expansion of system.

Lista de Tabelas

Tabela 1: Principais características das unidades de reservação do SUDA da cidade de Campina Grande, PB (elaborado a partir de informações da CAGEPA)	34
Tabela 2: Consumos e ligações do SUDA em Campina Grande, PB.	37

Lista de Figuras

Figura 1: Exemplo esquemático dos elementos que formam os sistemas urbanos de distribuição de água	8
Figura 2: Componentes de um Sistema de Informação Geográfica (adaptado de Eastman, 2003)	17
Figura 3: Exemplo da organização da base de dados em planos de informação em um SIG para análises espaciais de SAA.....	21
Figura 4: Diferenças entre estruturas de dados vetoriais e matriciais (Heywood & Cornelius, 1998).....	23
Figura 5: Diagrama ilustrativo de um SIG utilizado no planejamento de um SAA urbano (Adaptado de Solano & Sebastián, 2002).....	24
Figura 6: Exemplo esquemático do processo de normalização linear de critérios para uma mesma unidade, segundo um grau de adequação de 0 a 10.....	28
Figura 7: Exemplo esquemático do processo de normalização linear de critérios para uma mesma unidade, segundo um grau de adequação de 0 a 10.....	28
Figura 8: Localização geográfica do município de Campina Grande, PB	29
Figura 9: Representação do relevo da cidade de Campina Grande, PB através de Modelo Numérico de Terreno em TIN (elaborado a partir de dados da CAGEPA).....	30
Figura 10: População residente nas ultimas décadas em Campina Grande, PB (elaborado a partir de dados do IBGE).....	31

Figura 11: Taxa de urbanização ao longo das ultimas décadas (elaborado a partir de dados do IBGE)	32
Figura 12: Evolução no espaço urbano (1984-2007) e vetores de crescimento na cidade de Campina Grande, PB.....	33
Figura 13: Sistema Adutor Epitácio pessoa, responsável pelo abastecimento de Campina grande (Fonte: CAGEPA)	35
Figura 14: Modelo esquemático dos procedimentos metodológicos.....	40
Figura 15: Aspecto esquemático de uma informação gerada em um SIG.....	42
Figura 16: Modelagem espacial da Alternativa 1	49
Figura 17: Modelagem espacial da Alternativa 1 (continuação).....	50
Figura 18: Modelagem espacial da Alternativa 2	51
Figura 19: Exemplo de extração de informação de um PI a partir de uma área de interesse (ESRI, 2006).....	52
Figura 20: Localização das unidades de reservação operadas do SUDA de Campina Grande e rede geral com principais anéis.....	53
Figura 21: Áreas de influência das unidades de reservação do SUDA de Campina Grande, PB.....	54
Figura 22: Modelagem numérica do terreno em grade regular (elaborado a partir de dados da CAGEPA)	56
Figura 23: Representação esquemática da altura geométrica em relação a um plano de referência específico	57
Figura 24: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R4.....	58
Figura 25: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R5.....	58
Figura 26: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R6.....	58
Figura 27: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R7	59
Figura 28: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R9.....	59
Figura 29: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R10..	59
Figura 30: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R11..	60
Figura 31: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R12..	60

Figura 32: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R13..	60
Figura 33: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R18..	61
Figura 34: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R19..	61
Figura 35: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R29..	61
Figura 36: Distâncias obtidas em relação à unidade R4.....	62
Figura 37: Distâncias obtidas em relação à unidade R5.....	62
Figura 38: Distâncias obtidas em relação à unidade R6.....	62
Figura 39: Distâncias obtidas em relação à unidade R7.....	63
Figura 40: Distâncias obtidas em relação à unidade R9.....	63
Figura 41: Distâncias obtidas em relação à unidade R10.....	63
Figura 42: Distâncias obtidas em relação à unidade R11.....	64
Figura 43: Distâncias obtidas em relação à unidade R12.....	64
Figura 44: Distâncias obtidas em relação à unidade R13.....	64
Figura 45: Distâncias obtidas em relação à unidade R18.....	65
Figura 46: Distâncias obtidas em relação à unidade R19.....	65
Figura 47: Distâncias obtidas em relação à unidade R29.....	65
Figura 48: População em Campina Grande segundo censo do IBGE (2000).....	67
Figura 49: Número de domicílios atendidos através da rede geral do SUDA em Campina Grande segundo censo do IBGE (2000).....	68
Figura 50: Uso do solo da cidade de Campina Grande para o ano de 2006.....	69
Figura 51: Zoneamento utilizado no SUDA de Campina Grande.....	71
Figura 52: Distâncias à rede geral (principais anéis).....	72
Figura 53: Representação espacial da capacidade de armazenamento do SUDA de Campina Grande.....	73
Figura 54: Funções de normalização linearmente decrescentes do critério altura geométrica para as unidades de reservação analisadas.....	77

Figura 55: Mapas de alturas geométricas normalizados para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificados em faixas de riscos a desabastecimento para as unidades de reservação analisadas.....	78
Figura 56: Mapas de alturas geométricas normalizados para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificados em faixas de riscos a desabastecimento para as unidades de reservação analisadas (continuação).....	79
Figura 57: Funções de normalização linearmente crescentes do critério distâncias para as unidades de reservação analisadas.....	80
Figura 58: Mapas de distâncias normalizados para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificados em faixas de riscos a desabastecimento para as unidades de reservação analisadas	81
Figura 59: Mapas de distâncias normalizados para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificados em faixas de riscos a desabastecimento para as unidades de reservação analisadas (continuação).....	82
Figura 60: Funções de normalização linearmente crescente do critério população para as unidades de reservação analisadas	83
Figura 61: Mapas de números populacionais normalizados para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente crescente e classificados em faixas de riscos a desabastecimento para as unidades de reservação analisadas.....	84
Figura 62: Mapas de números populacionais normalizados para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente crescente e classificados em faixas de riscos a desabastecimento para as unidades de reservação analisadas (continuação).....	85
Figura 63: Funções de normalização linearmente decrescente do critério Nº de domicílios atendidos para as unidades de reservação analisadas	86
Figura 64: Mapas de números de domicílios normalizados para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificados em faixas de riscos a desabastecimento para as unidades de reservação analisadas.....	87
Figura 65: Mapas de números de domicílios normalizados para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificados em faixas de riscos a desabastecimento para as unidades de reservação analisadas (continuação).....	88

Figura 66: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R4.....	89
Figura 67: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R5.....	90
Figura 68: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R6.....	90
Figura 69: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R7.....	90
Figura 70: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R9.....	91
Figura 71: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R10.....	91
Figura 72: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R11.....	91
Figura 73: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R12.....	92
Figura 74: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R13.....	92
Figura 75: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R18.....	92
Figura 76: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R19.....	93
Figura 77: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R29.....	93
Figura 78: Funções de normalização do critério altimetria para as zonas analisadas.....	94
Figura 79: Mapa de altimetria normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente crescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona A.....	95

Figura 80: Mapa de altimetria normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente crescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona B.....	95
Figura 81: Mapa de altimetria normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente crescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona C.....	96
Figura 82: Mapa de altimetria normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente crescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona D	96
Figura 83: Funções de normalização do critério distâncias à rede geral para as zonas analisadas	97
Figura 84: Mapa de distâncias normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona A.....	97
Figura 85: Mapa de distâncias normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona B.....	98
Figura 86: Mapa de distâncias normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona C.....	98
Figura 87: Mapa de distâncias normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona B.....	99
Figura 88: Funções de normalização do critério volume armazenado para as zonas analisadas	100
Figura 89: Mapa de volumes armazenados normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona A.....	100
Figura 90: Mapa de volumes armazenados normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona B	101

Figura 91: Mapa de volumes armazenados normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona C	101
Figura 92: Mapa de volumes armazenados normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona D.....	102
Figura 93: Indicação de áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação na Zona A.....	103
Figura 94: Indicação de áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação na Zona B.....	103
Figura 95: Indicação de áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação na Zona C.....	104
Figura 96: Indicação de áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação na Zona D.....	104

Listas de Abreviaturas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAGEPA – Companhia de Água e Esgoto da Paraíba

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LANDSAT – Land Remote Sensing Satellite

MNT – Modelo Numérico de Terreno

NBR – Normas Técnicas Brasileiras

NMR – Nível Médio do Reservatório

SAA – Sistemas de Abastecimento de Água

SADE – Sistema de Apoio à Decisão Espacial

SCADA – Supervision Control and Data Acquisition Station

SEPLAN – Secretaria de Planejamento do Municipal

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

SUDA – Sistemas Urbanos de Distribuição de Água

TIN – Triangular Irregular Network

Capítulo 1: Introdução

1.1 Considerações iniciais

A importância indiscutível da água para a satisfação das inúmeras atividades humanas, o crescimento acelerado das demandas, os custos associados aos serviços de água, a implantação das novas técnicas de planejamento, entre outras variáveis, têm sido motivações para o desenvolvimento de diversos estudos na área que abrange os Sistemas de Abastecimento de Água (SAA).

A dinâmica de crescimento dos centros urbanos associada ao aumento populacional provoca uma contínua expansão dos Sistemas Urbanos de Distribuição de Água (SUDA), fato que os caracteriza como equipamentos complexos exigindo, muitas vezes, soluções eficazes que possam refletir no seu adequado planejamento. Devido a tal complexidade, a tomada de decisões com o auxílio de ferramentas que possibilitem a indicação das soluções ótimas torna-se bastante relevante.

Solano (2002) concorda que nas técnicas modernas de planejamento dos SAA, os serviços oferecidos devem integrar aspectos quantitativos e qualitativos, sempre associados a previsões de longo prazo do crescimento da demanda. Assim, uma gestão eficiente dos SAA deve começar com a obtenção do conhecimento das redes de distribuição mediante diagnósticos e análises.

A localização ou disposição espacial mais adequada de certos equipamentos sobre o território, ou seja, aquela considerada como *ótima*, é uma técnica de grande relevância, em virtude da possibilidade de aprimorar certos tipos de serviços prestados à sociedade (Sendra & Jiménez, 2007), além de resultar em benefícios econômicos. Motivos pelos quais ela tem sido objeto de muitas discussões (DeVerteuil, 2000; Curtin & Church, 2006; Sendra & Jiménes, 2007; Sendra *et al*, 2007).

Neste sentido, uma disposição espacial adequada das unidades de reservação que compõem estes sistemas poderá contribuir expressivamente no aprimoramento do serviço oferecido, principalmente quando a tomada de decisão é apoiada pelos Sistemas de Informação Geográfica (SIG, do inglês: Geographical Information Systems).

Os SIG, por sua vez, possuem recursos de gerenciamento e visualização das informações, de análises e inferências espaciais e podem ser utilizados como Sistemas de Suporte à Decisão Espaciais (SADE, do inglês: Spatial Decision Support Systems) para

apoiar no planejamento adequado da água no espaço urbano, inclusive pelas concessionárias que oferecem esse tipo de serviço.

1.2 Caracterização do problema

Em planejamento de redes de distribuição de água ou até mesmo nos SAA como um todo, devem ser considerados os aspectos sociais e econômicos, os quais, intervêm uma grande quantidade de variáveis que devem ser entendidas e interpretadas utilizando, muitas vezes, modelos de simulação como ferramenta de apoio na tomada de decisão. A indicação da disposição espacial de unidades de reservação dos sistemas distribuidores de água tem como propósito promover diversos aspectos sociais e econômicos que podem estar presentes nos planos e programas relacionados aos SAA.

Muitos estudos atentam para as falhas no processo de planejamento dos SAA e sugerem novas propostas e técnicas hidráulicas para enfrentar e ultrapassar esses problemas (Bau, 2000; Britto & Oriá, 2000, Buzeti *et al*, 2000; Righetto, 2002; Simão & Rodrigues, 2003; Lopes *et al*, 2004; Carrijo & Reis, 2005).

Segundo a ABNT (1994) - Associação Brasileira de Normas Técnicas, através da NBR Nº 12.217, os elementos de projeto necessários para a concepção de reservatórios dos SAA são: definição das etapas de implantação; cotas dos níveis de água, máximo e mínimo; elementos topográficos e sondagens da área. A referida norma cita ainda que, a locação das unidades, está entre as atividades necessárias de projeto.

Portanto, torna-se necessária a integração de conceitos, princípios e tecnologias que possam auxiliar como ferramentas na concretização de estudos que resultem em diversos benefícios, como os citados por Sendra & Jiménez (2007): minimização de custos, maximização do desempenho, maximização de atendimento à demanda, entre outros.

Como o problema a ser solucionado exige uma decisão que depende diretamente das características espaciais das informações envolvidas, pode-se, utilizar os SIG como SADE para apoio nesta fase de planejamento.

Dentre as técnicas, abrigadas pelos SIG, e que podem ser utilizados no estudo da problemática da disposição mais adequada de equipamentos estão: modelagem numérica do terreno, técnicas de análise espacial, integração entre simulador hidráulico, entre outras que se mostrarem cabíveis.

Ao investigar o atual estado de desenvolvimento de estudos indicadores da otimização dos SUDA, em que se verifica uma lacuna no uso de técnicas que reflitam na busca de soluções ótimas para a disposição espacial de reservatórios, observa-se que é indispensável a utilização de ferramentas adequadas que possibilitem uma otimização do planejamento.

Simão & Rodrigues (2003) ressaltam que há carências de soluções mais eficientes que possam trazer avanços na qualidade do serviço a menores custos.

Goes Filho (1998) recomenda que um estudo sério e detalhado deve ser efetuado para estabelecer relações entre a rede de abastecimento e seus componentes, principalmente devido aos elevados investimentos necessários para a implantação e operação desses sistemas.

Gameiro *et al* (2005) esclarecem que tradicionalmente o dimensionamento desses sistemas se baseiam na experiência do projetista, porém, na medida em que os núcleos urbanos foram se ampliando, aumentando a complexidade do próprio sistema distribuidor de água, o problema passou a envolver um grande número de variáveis de decisão (por exemplo, alternativas de traçado, localização de singularidades, válvulas e bombas), tornando estes procedimentos insuficientes para garantir que a solução resultante fosse efetivamente a mais viável.

Os estudos nesta área devem resultar em conhecimentos que possam contribuir para o desenvolvimento de melhores projetos de distribuição de água das cidades, minimizando os custos e favorecendo a manutenção e operação, bem como atender satisfatoriamente toda a demanda usuária do serviço.

A fim de indicar os pontos ou áreas ótimas para a localização destas unidades de reservação, este estudo fundamenta-se na utilização de técnicas que possibilitem uma maior viabilidade para a modernização das atuais práticas de localização dos reservatórios constituintes do SUDA.

Partindo do princípio que o estudo da disposição mais adequada, ou seja, aquela considerada como ótima diante de determinados critérios, é fato bastante significativo no planejamento dos SUDA, a escolha destes locais torna-se uma decisão complexa que pode ser apoiada por ferramentas do geoprocessamento.

Neste contexto, elegeu-se a cidade de Campina Grande, PB como área de estudo em virtude desta apresentar características físicas e sociais pertinentes, tais como: considerável crescimento urbano, relevo acidentado, falhas no abastecimento em alguns pontos da cidade, entre outros.

As propostas principais do estudo são: investigar a problemática da localização de unidades de reservação apoiando-se em múltiplos critérios, de forma a viabilizar determinados elementos que a eles se associam, tais como: custos, infra-estruturas, operação e manutenção, desempenho, demanda, etc. e indicar propostas para implantação de novas unidades que possam representar novas diretrizes de planejamento do sistema. Essas propostas, portanto, são realizadas sob duas linhas: um diagnóstico da situação atual e prognósticos que simulam a implantação de novas unidades em virtude da expansão da demanda.

1.3 Objetivos

- Investigar possibilidades de modelagem e otimização da localização de equipamentos relacionados ao SUDA, utilizando métodos e técnicas de geoprocessamento na análise dos dados.
 - Estabelecer um diagnóstico da problemática da localização dos reservatórios de abastecimento de água em áreas urbanas utilizando a cidade de Campina Grande como área de estudo;
 - Indicar, através de simulações, áreas para a disposição mais adequada (*ótima*) de unidades de reservação.

Capítulo 2: Fundamentação Teórica

2.1 Considerações gerais

A água é um recurso natural essencial ao bem-estar e à saúde da população. Os Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) desempenham a função de conduzir a água em quantidade e qualidade adequadas aos usuários para que estes possam realizar diversas atividades.

Nas últimas décadas, buscando atender a demanda decorrente do crescimento populacional urbano e da industrialização, os SAA passaram por grandes ampliações (Soler, 2008). Segundo a Pesquisa Nacional sobre Saneamento Básico realizada pelo IBGE (2000) 97,9% dos municípios brasileiros já contavam com serviços de abastecimento de água prestado por alguma concessionária de água. Observa-se que a expansão urbana gera a necessidade de ampliações do serviço de distribuição de água.

Ono (2008) adverte que, apesar dos serviços de distribuição de água cobrirem grande parte das áreas urbanas, a falta de planejamento dos mesmos, muitas vezes, dá origem a diversos problemas, tais como: altos volumes de perdas, descontinuidade no abastecimento em algumas zonas, dificuldades na operação e manutenção, entre outros. Contudo, o planejamento dos SUDA tem sido objeto de grande interesse às instituições responsáveis pela execução dos mesmos, principalmente, quando se tratam de sistemas complexos presentes na maior parte dos médios e grandes centros urbanos.

Segundo Tsutiya (2001) a concepção de um sistema de abastecimento de água é extremamente dependente do porte da cidade, topografia e localização do manancial de abastecimento.

Dentre as atividades relacionadas à fase de planejamento dos SUDA está a disposição otimizada de elementos que os constituem, que dentre outros, se encontra as unidades de reservação, equipamentos urbanos considerados neste estudo. Equipamentos urbanos, como menciona a Lei Nº 6.766 (Brasil, 1979), são os equipamentos públicos de abastecimento de água, serviços de esgotos, energia elétrica, coletas de águas pluviais, rede telefônica e gás canalizado. A Lei Nº 11.445 (Brasil, 2007) ressalta que a infra-estrutura básica das glebas urbanas é constituída pelos equipamentos urbanos de escoamento das águas pluviais, iluminação pública,

esgotamento sanitário, abastecimento de água potável, energia elétrica pública e domiciliar e vias de circulação.

Em se tratando de planejamento de sistemas de distribuição de água, verifica-se um alto volume de variáveis envolvidas, implicando em um grande número de decisões a serem tomadas. Assim, torna-se necessário se dispor de ferramentas de caráter integrador que facilitem essa tomada de decisão. Neste sentido, os SIG, com seus recursos de gerenciamento e visualização das informações, de análises e inferências espaciais, podem ser utilizados como SADE para apoio à gestão, auxiliando em todas as fases de um processo decisório.

Desta forma, a disposição mais adequada (ótima) das unidades de reservação que constituem os SUDA, é analisada neste trabalho, sob duas óticas: um diagnóstico da situação atual e um prognóstico, indicando locais ou zonas de implantação de novas unidades.

2.2 Disposição espacial de equipamentos urbanos

A determinação da posição mais adequada para situar diversos tipos de equipamentos tem sido um enfático problema geográfico com significativas repercussões econômicas, sociais e ambientais (Sendra *et al*, 2001).

Diversas técnicas e metodologias espaciais são formuladas para a determinação de posições geográficas adequadas (ótimas) para distintos tipos de equipamentos ou atividades, principalmente no meio urbano.

As técnicas mais precisas são aquelas que utilizam modelos que proporcionem, através da indicação da disposição mais adequada, a eficiência e otimização de elementos que constituem o problema estudado. Esses modelos quando associados a procedimentos de avaliação multicriterial e integrados com os SIG dão origem a um robusto sistema de ajuda na tomada de decisão (Barredo & Sendra, 1999).

Sendra *et al* (2001) explica que as técnicas associadas a adequada disposição de determinado equipamento pode oferecer um amplo campo de análises e soluções para conflitos sócio-econômicos entre as diferentes políticas e distintas administrações. Muitas vezes, o alto grau de complexidade associado a essas questões exige o auxílio de ferramentas que possibilitem o apoio na escolha da melhor alternativa. A necessidade de dispor de um SIG para auxiliar no processo de planejamento e formulação de políticas tem emergido com uma extraordinária vertente.

DeVerteuil (2000) observa que as inovações tecnológicas presentes nos SIG têm potencial para sustentar os conceitos relacionados com a otimização da disposição espacial de equipamentos urbanos ao longo de duas linhas distintas: como domínio técnico para modelos quantitativos tradicionais, com efeito particular na integração, no gerenciamento e na visualização de diversos dados e como ferramenta analítica potencial para modelos pré-estabelecidos.

Os sistemas de informação geográfica possuem diversas aplicabilidades na definição de problemas, em análises complexas na adoção de serviços, na predição e simulação de diferentes impactos sobre diferentes alternativas de disposição espacial de elementos constituintes do espaço geográfico, entre outros. Fato que tem expandido a utilização destas ferramentas no planejamento de diversos equipamentos urbanos (Sendra *et al*, 2007).

Em sistemas de abastecimento de água há inúmeras variáveis envolvidas, fato que aumenta a complexidade e as possibilidades dos SIG poderem ser usados efetivamente como SADE. Solano & Sebastián (2002) explicam que de uma forma geral, a aplicação dos SIG possibilita a criação de uma base inteligente para a gestão e análise de todos os dados que compõem os SAA. Assim, é possível importar dados para modelos de simulações, integrar medições para controle de perdas, favorecer a gestão dos usuários, entre outros.

2.2.1 Tipos de equipamentos

Os equipamentos urbanos podem ser caracterizados em dois tipos: os que produzem um efeito benéfico gerando externalidades positivas (desejáveis pelos usuários), como escolas, hospitais, comércios e aqueles que geram externalidades negativas, como centrais nucleares, aterros sanitários, etc. (não desejáveis do ponto de vista da proximidade aos usuários) (Sendra *et al*, 2001).

Neste contexto, as unidades de reservação que constituem os SUDA são considerados como equipamentos desejáveis no sentido de que sua localização reflete na qualidade do serviço de abastecimento de água prestado à população.

2.2.2 Caracterização dos elementos do problema

Assim como outros equipamentos urbanos, os elementos que compõem os SUDA podem assim ser descritos (Figura 1):

- Demanda: são os usuários (população, comércio, indústrias, etc.) que desejam utilizar o serviço que está distribuído pelo território;
- Oferta: são os locais onde se implantam as instalações;
- Rede de condução: são os acessos de comunicação e de relação entre a demanda e a oferta.

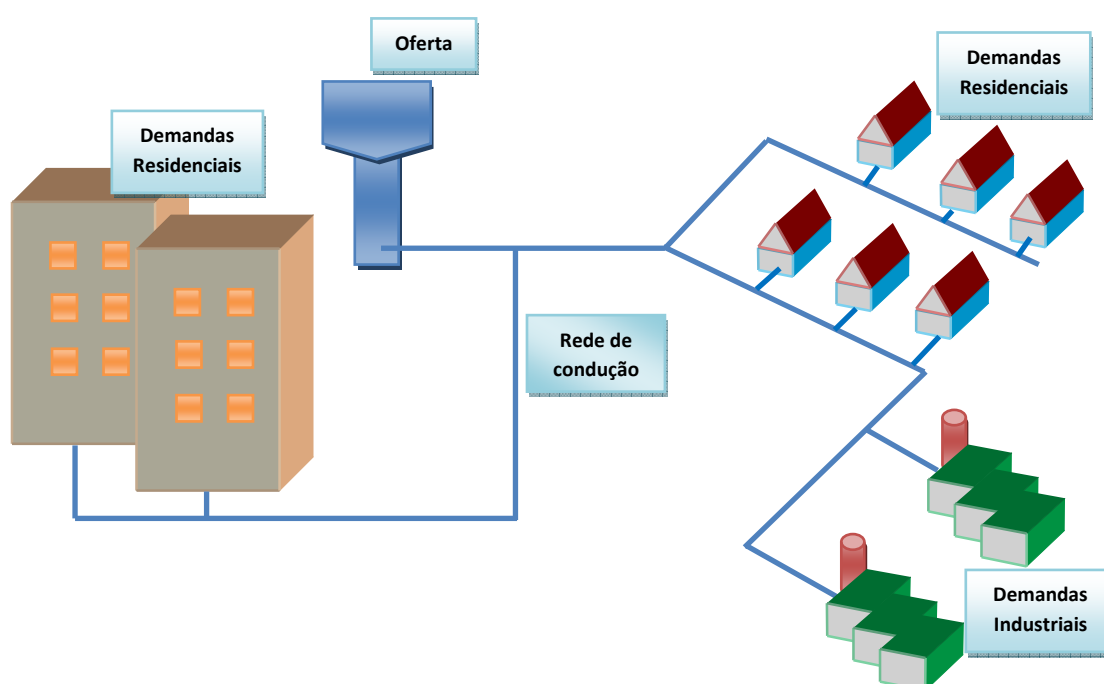


Figura 1: Exemplo esquemático dos elementos que formam os sistemas urbanos de distribuição de água

A definição destes três elementos: oferta, demanda e rede de condução são informações necessárias para uma correta representação digital em um sistema de informação geográfica. A definição da rede de condução depende da distribuição espacial da oferta e da demanda, ou seja, depende dos tipos de objetos espaciais que se atribuem a oferta ou a demanda: pontos, linhas ou polígonos.

Os dados demográficos que formam a base de cálculo da demanda potencial de qualquer instalação de oferta podem ser obtidos nos formatos de elementos poligonais de tamanho relativamente importante em relação à superfície total da área de estudo, como os lotes urbanos.

Em função dos dados e informações envolvidos, Sendra *et al* (2001) sugere que na resolução de problemas de otimização da disposição espacial de equipamentos urbanos duas etapas fundamentais devem ser consideradas:

- i. Avaliação da situação atual da oferta disponível;
- ii. Busca de locais para novos centros de oferta.

Algumas informações são fundamentais, tais como: o número de instalações existentes; a posição geográfica das instalações de oferta, representadas aqui pelas unidades de reservação e das demandas, representadas pelos lotes urbanos; o número de novas instalações a serem implantadas, entre outras.

2.3 Planejamento de Sistemas Urbanos de Distribuição de Água

A inadequação do planejamento, ou a falta de sua implementação, cria e agrava problemas sociais de intensa dimensão (Lopes, 2004). Tradicionalmente o projeto dos SUDA baseava-se na experiência do projetista, contudo, à medida que os núcleos urbanos foram se expandindo, esse tipo de sistema tornou-se mais complexo, emergindo, portanto, a necessidade de técnicas mais robustas para seu adequado planejamento e gerenciamento.

Aliada a esta necessidade, o avanço tecnológico e computacional tornou possível o desenvolvimento de modelos que permitissem ações de planejamento compatíveis com esta complexidade, possibilitando também o desenvolvimento de modernas técnicas de otimização e de operação dos referidos sistemas (Souza *et al*, 2005).

Dentre estas técnicas destaca-se a ciência do geoprocessamento, especialmente, os sistemas de informação geográfica que têm se mostrado eficiente na modelagem de problemas não estruturados, tendo conquistado aceitação entre os gestores de recursos hídricos.

Mudanças na bem estabelecida prática de engenharia referente ao projeto de redes de distribuição de água vêm ocorrendo de forma surpreendente, influenciadas pelos sistemas modernos de planejamento e gerenciamento e através das facilidades computacionais (Righetto, 2002).

A solução de problemas de planejamento de elementos em um SUDA envolve um grande número de restrições e variáveis de decisão. Estas variáveis podem ser a topografia da área, distâncias da rede e de pontos de oferta (reservatórios) aos usuários,

localização de singularidades (válvulas e bombas), entre outras. Em razão desse alto volume de variáveis, os SIG, com suas funções de reunir, introduzir, armazenar, recuperar, transformar e cartografar dados sobre o mundo real (Sendra, 1997) é considerado uma ferramenta útil na modelagem e otimização de diversos elementos que compõem as redes de distribuição de água, atuando principalmente, na tomada de decisão, importante aspecto na fase de planejamento.

Em projetos de SUDA, quanto se trata de incorporar novos elementos em virtude da expansão do serviço de distribuição de água, o processo de planejamento deve cumprir diferentes aspectos que afetam o processo decisório. Assim, alguns elementos devem ser considerados (Solano *et al*, 2002):

- necessidade: comprovação da necessidade dos novos elementos;
- impactos: verificação da influência dos novos elementos ao meio a nível ambiental e funcional;
- viabilidade: antes da implantação deve-se calcular as necessidades de recursos humanos e materiais como a disponibilidade de financiamento;
- confiabilidade: a solução final deve satisfazer as necessidades para as quais foi implantado o novo elemento, como minimizar riscos e falhas no funcionamento do sistema;
- controle: a última fase será a de controle de todo o processo de execução com relação aos prazos e aos recursos alocados.

Considerando as unidades de reservação que compõem os SUDA como elementos que serão avaliados, a abordagem do planejamento desses sistemas pode ser alcançada a partir de um diagnóstico da situação atual do sistema e da modelagem e otimização na ampliação de novos elementos da rede, este último quase sempre associado à expansão urbana.

2.3.1 Expansão dos Sistemas Urbanos de Distribuição de Água

Dentre os distintos aspectos envolvidos na modelagem e otimização de SUDA está o planejamento para expansões futuras do sistema (Carrijo, 2004) que originam novos elementos e sua incorporação à rede. Solano & Sebastián (2002) explicam que o planejamento pode ser interpretado como a detecção da necessidade de implantação de novos elementos hidráulicos ao sistema em um horizonte de longo prazo. Esta

necessidade ocorre, em geral, quando a oferta existente deixa de atender adequadamente as demandas.

Hsu *et al* (2008) explicam que em planejamento de SUDA a expansão da capacidade de atendimento do serviço é, muitas vezes, necessária, pois se torna economicamente inviável instalar capacidades excedentes, quando a demanda inicial é pequena

Lopes *et al* (2004) concordam que estudos de capacidade de atendimento e previsão de demanda de água são necessários para auxiliar a tomada de decisão diante de problemas técnicos na captação ou na estação de tratamento, bem como na questão do adensamento populacional urbano.

A expansão da capacidade de reservação é uma necessidade sempre presente nos SUDA, tornando-se uma alternativa importante para assegurar a regularidade da distribuição da água tratada. Contudo, Lopes (2003) ressalta que, muitas vezes, os planos de expansão de elementos da rede de distribuição de água não obedecem aos requisitos de adequação técnica, culminando com o suprimento indevido das necessidades de água, por falta de vazão mínima ou de pressão. Quando entre as concessionárias e o órgão de planejamento urbano falta interação, a expansão urbana, em geral, ocorre à frente das possibilidades de atendimento à demanda.

Neste sentido, a modelagem e otimização da disposição espacial das unidades de reservação que compõem os SUDA através de análises e inferências espaciais presentes nos SIG, podem nortear o adequado planejamento desses sistemas, pois possibilitam: facilidade de manejo das informações envolvidas, ampla visualização do problema, utilização de múltiplos critérios nas análises, entre outros.

2.3.2 Unidades de Reservação

Um Sistema Urbano de Distribuição de Água é um conjunto de elementos destinados a conduzir a água até os pontos de consumo, sempre de forma contínua e segura no sentido de permitir o suprimento de água.

As unidades de reservação constituem elementos base dos SUDA. São funções básicas desses elementos (Miquel e Patiño, 2002):

- Assegurar o abastecimento no caso de possíveis indisponibilidades (falhas no processo de bombeamento, rompimentos na adução, etc.);
- Segurança no abastecimento (alimentação por gravidade oferece maior garantia no abastecimento);

- Armazenamento de importantes volumes de água;

Os reservatórios de distribuição são destinados a regularização das variações das vazões de adução e de distribuição e condicionar as pressões na rede de distribuição (ABNT, 1994). A regulação mediante reservatórios pode resultar em benefícios, tais como (Miquel e Patiño, 2002):

- Possibilidade de armazenamento de grandes volumes de água, frente a possíveis circunstâncias críticas (incêndios ou danos na rede);
- Independência do sistema de bombeamento na vazão consumida na distribuição, ocorrendo certa otimização do sistema de bombeamento encarregado de fornecer água ao reservatório;
- Aproveitamento da tarifa energética, pois o processo de bombeamento pode ocorrer em momentos de baixo custo tarifário de energia, armazenando água quando esse custo for mais alto.

2.3.3 Disposição espacial das unidades de reservação

Os reservatórios são unidades hidráulicas de acumulação e passagem de água, situados em pontos estratégicos do SUDA com o propósito de atenderem as seguintes situações (Fernandes, 2008):

- garantia da quantidade de água (demandas de equilíbrio, de emergência e de anti-incêndio);
- garantia de adução com vazão e altura manométrica constantes;
- menores diâmetros das tubulações do sistema;
- melhores condições de pressão.

Neste sentido, recomenda-se que a instalação do reservatório seja em local com valores elevados de altimetria, a fim de possibilitar o emprego do elemento gravidade, a fim de possibilitar a garantia pressões necessárias na distribuição de água, inclusive nas horas de maior consumo.

A localização adequada de um reservatório para atender determinada zona da rede, aumenta a confiabilidade operacional, além de possibilitar a otimização das condições de funcionamento do sistema através da economia de energia elétrica.

As condições altimétricas da região são critérios de decisão que devem ser utilizados na escolha dos locais para implantação de unidades de reservação nos sistemas de distribuição de água (Barbbitt *et al*, 1962).

Quanto à classificação em relação à localização, os reservatórios de distribuição podem ser: enterrados, quando completamente introduzidos no terreno; semi-enterrados, quando parte da altura líquida está abaixo do nível do terreno; apoiados, quando a laje de fundo se encontra apoiada no terreno e elevados, quando o reservatório se encontra em estruturas de elevação. A seleção do tipo está relacionada às pressões necessárias ao adequado funcionamento do sistema e conseqüentemente as características altimétricas da região.

Em geral, quando o armazenamento está ao nível do terreno (reservatórios apoiados) são utilizados sistemas elevatórios para manter as pressões requeridas no sistema. Em outras ocasiões o armazenamento se dá por meio de reservatórios elevados de maneira que este esteja situado em uma cota de terreno acima da zona de distribuição para proporcionar pressão necessária por gravidade.

Assim, a construção de reservatórios elevados, apesar do alto custo de implantação quando comparados com os reservatórios de demais tipos, pode ser uma solução quando as cotas do terreno não são adequadas.

Em relação ao armazenamento apoiado pode-se enfatizar, entre outros: um menor custo de implantação e manutenção, fácil observação da qualidade da água, maior segurança, anulação de questões associadas à estética do meio urbano, entre outras.

A economia relativa do armazenamento através de diferentes tipos de unidades de reservação (apoiado ou elevado) depende das condições locais e de projeto dos serviços de água. Não obstante, a implantação do reservatório elevado geralmente é mais onerosa em relação ao apoiado.

Por conseguinte, a localização de uma unidade de reservação que tem função de distribuição tem um efeito acentuado nas pressões do sistema distribuidor de água. O ideal é a implantação destas unidades em locais que não possibilitem grandes variações nas pressões requeridas que segundo a ABNT (1994) devem ser de 50 m.c.a. para pressões estáticas máximas e de 10 m.c.a. para pressões dinâmicas mínimas. Valores fora desta faixa podem ser aceitos desde que justificados técnica e economicamente.

Outro critério associado à localização de reservatórios de distribuição e não menos importantes são as distâncias dos reservatórios às zonas de consumo. Distâncias elevadas podem derivar problemas na distribuição de água em função, principalmente, das perdas de energia que a água sofre ao ser transportada.

As unidades de reservação com função de distribuição devem ser localizadas no centro, ou tão próximo possíveis, da zona a que servem. A razão para uma localização

central é possibilitar a minimização das perdas por atrito nos tubos de distribuição, fato que pode reduzir o alcance da água às demandas atendidas.

2.3.4 Simuladores hidráulicos e SIG

Os modelos de análise hidráulica de redes de distribuição são ferramentas essenciais nos estudos modernos de projeto e operação dos sistemas de abastecimento, uma vez que eles permitem avaliar diferentes cenários de funcionamento e auxiliam o processo de tomada de decisão (Formiga & Chaudhry, 2008).

Visando obter alternativas de projeto que atenda a requisitos de maneira eficiente e econômica, os modelos de simulação hidráulica, quando dinâmicos, transformam as grandezas hidráulicas ao longo do tempo, em função de variações temporais dos consumos de água nos nós da rede (Gomes, 2004).

O EPANET (Rossman, 2000) é um modelo de simulação hidráulica de domínio público que permite executar simulações hidráulicas e de parâmetros de qualidade de água em sistemas de distribuição de água. Desenvolvido pela U. S. Environmental Protection Agency (U. S. EPA), é amplamente utilizado e atestado em diversos estudos sobre modelagem de sistemas de abastecimento de água. Através de sua biblioteca dinâmica de funções (Dynamic Link Library - DLL), o EPANET permite personalizar mecanismos computacionais fazendo uso do simulador para as necessidades específicas de cada problema a ser tratado, consistindo em um conjunto com mais de cinquenta funções que podem ser incorporadas em aplicações de 32 bits para MS® Windows®, escritas em linguagens C/C++, Delphi™ Pascal, Visual Basic™ ou outro tipo de linguagem que permita a chamada de funções Windows DLL.

Dentre as funções abrigadas na modelagem através do EPANET estão: cálculos perdas de cargas, inclusive unitárias; modelagem do funcionamento de bombas; cálculos de energia de bombeamento e respectivos custos; modelagem dos principais tipos de válvulas; modelagem de reservatórios de armazenamento de níveis fixos e variáveis; considerações de múltiplas categorias de consumo e sua variação no tempo; modelagem das relações entre pressões e vazões efluentes de dispositivos emissores (por exemplo, consumos dependentes da pressão); possibilidade de obter condições de operação do sistema com controles simples ou múltiplos (Dias, 2006).

Além da sua eficácia e robustez comprovada em diversos estudos, um dos principais motivos que aumentam a notoriedade do EPANET no meio científico é sua

capacidade de integração a outros modelos computacionais podendo, ser adaptado conforme a necessidade da aplicação.

Castro (2004) apresentou um pacote computacional que cria uma forma dinâmica de exportar arquivos do CAD para o EPANET, diminuindo os esforços gastos na fase de pré-processamento da simulação computacional.

Bahadur *et al* (2001) desenvolveram um sistema para integrar EPANET e ArcGIS (ESRI) chamado PipelineNET para auxiliar aos gestores de SAA na avaliação de riscos para fornecimento público de água em relação à qualidade da água.

Bartolin & Martínez (2003) desenvolveram uma extensão chamada GISRed que integra o EPANET ao ArcGis (ESRI) e gera um módulo de calibração baseado em algoritmos genéticos juntamente com as funções originais do SIG. Esta extensão é uma ferramenta para auxílio nas tarefas de modelagem de redes de distribuição de água e de suporte à tomada de decisão, tudo isto realizado dentro do ambiente SIG.

Tibúrcio (2006) desenvolveu uma interface em SIG para suporte ao dimensionamento hidráulico de SAA permitindo a comunicação entre simulador hidráulico EPANET e o ArcGis (ESRI). Esta interface tem como característica uma fácil interação para digitalizar componentes hidráulicos por coordenadas, dimensionar componentes do sistema, fornecer informação relacionada à operação, selecionar opções de simulação hidráulica, carregar o layout do sistema na área de trabalho do EPANET, visualizar os dados hidráulicos dos componentes após cada simulação, alterar e mover componentes hidráulicos para coordenadas apropriadas, entre outros.

2.4 Modelagem e Otimização em Sistemas de Informações Geográficas

Diversos estudos realizados na área de Recursos Hídricos são geralmente voltados para modelos que precisam de dados físicos que tradicionalmente são obtidos nos mapas ou com pesquisas de campo. Recentemente, estas informações estão sendo agregadas diretamente em sistemas de informação geográfica devido aos avanços tecnológicos advindos destes sistemas e às contínuas melhorias em modelo digital de terreno.

Rufino (2004) explica que embora seja uma ferramenta eficiente, a modelagem do conhecimento na base de dados de um SIG não é uma tarefa simples, pois em um processo decisório o problema não é estático e, muitas vezes, é de difícil representação.

Portanto, muitos dos procedimentos e interações são simplificações da realidade, privilegiando alguns aspectos em detrimento de outros.

Atualmente, esforços têm sido realizados para desenvolver interfaces em SIG que dêem suporte ao trabalho de projetistas de sistemas de abastecimento de água e, também, constata-se a existência de trabalhos com modelos hidráulicos aliados a SIG (Tibúrcio, 2006).

Ademais, os SIG têm sido utilizados como instrumento de consolidação e análise de grandes bases de dados sobre inventários de recursos naturais e humanos, controle de dados cadastrais e de propriedade urbana e rural (cadastro multifinalitário), planejamento e gestão urbana de equipamentos, cartografia, controle de grandes instalações (redes de abastecimento de água), saúde, entre outros.

Portanto, são uma tecnologia informatizada capaz de gerir e analisar grandes volumes de informações espaciais. Fazem parte dos Sistemas de Informação (SI), possuindo uma base de dados, uma base de conhecimento (conjunto de procedimentos de análises e manipulação de dados) e um sistema de interação com o usuário. Estes sistemas permitem a captura, armazenamento, manipulação, análise e exibição de dados georreferenciados, isto é, relacionados a entidades gráficas com representação espacial (Barcellos *et al*, 1998) e desta forma constituem um útil instrumento para o planejamento de diversos problemas que envolvem informações geográficas.

Estes sistemas possuem, na sua maioria, os seguintes subsistemas ou componentes lógicos (Sendra, 1997):

- componentes para a entrada de informação: procedimentos que permitem converter informação geográfica do formato analógico para o formato digital;
- componentes de saída: atividades que servem para mostrar os próprios dados incorporados na base de dados e os resultados das operações analíticas realizadas (mapas, gráficos, tabelas);
- componentes de gestão da informação espacial: função de extrair da base de dados as partes que interessam, sendo possível reorganizar todos os elementos integrados a ela de diversas maneiras.
- componentes analíticos: são os elementos mais característicos de um SIG. Facilitam o processamento dos dados integrados permitindo a geração de mais informações e maior conhecimento do que se dispunha inicialmente. Estas funções convertem os SIG em um instrumento de modelagem.

Observa-se, cada vez mais, o surgimento de novas aplicações e utilizações em campos e temas diversos. A Figura 2 apresenta os principais componentes que constituem os SIG.

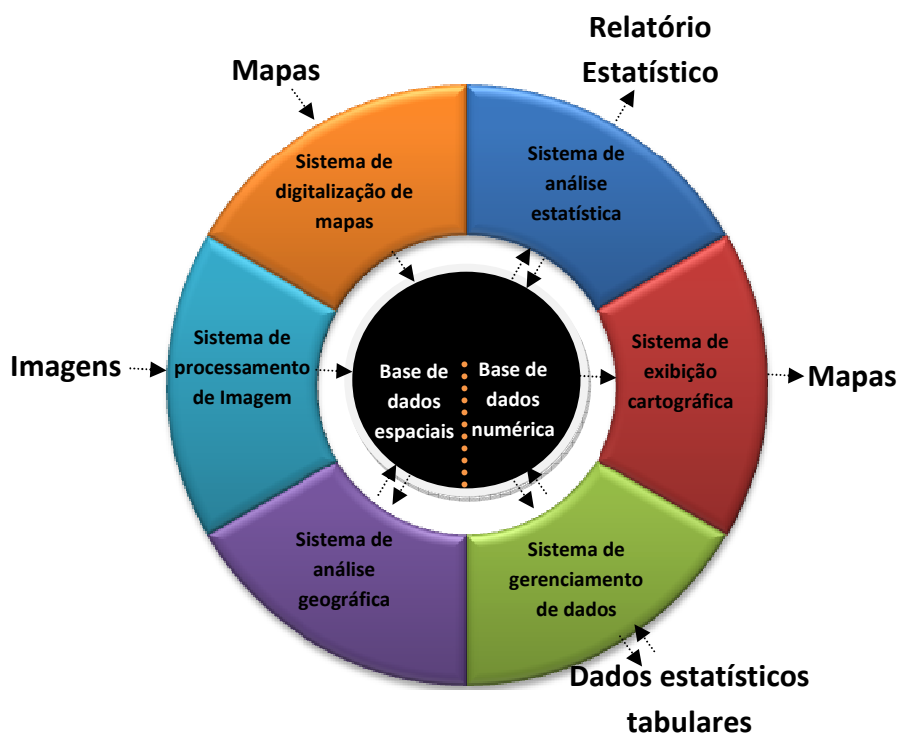


Figura 2: Componentes de um Sistema de Informação Geográfica (adaptado de Eastman, 2003)

Sendra (1997) explica que um elemento muito relacionado aos SI são os Sistema de Apoio a Decisão (SAD) que constitui um novo progresso e forma uma ferramenta especializada de utilidade parcial, porém mais robusta. Nele os dados e as bases de conhecimentos (regras) se estruturam para servir de ajuda à tomada de decisão, facilitando possíveis simulações na escolha de melhores alternativas para solução do problema analisado. Os SIG são em alguns casos, simultaneamente, um SAD Espacial (SADE).

Neste contexto a implantação dos SIG, quando utilizado com uma SADE, no planejamento e gestão dos SUDA pode resultar em benefícios diversos, tais como: minimização de custos, melhor atendimento aos usuários, eficiência na operação e manutenção, entre outros.

2.4.1 Funcionalidades na análise de dados em SIG

SIG é um dos produtos significantes deste período de alta mudança tecnológica (Tibúrcio, 2006). Na opinião de DeMers (2003), os Sistemas de Informação Geográfica estão mudando a maneira como os mapas são tratados, como as informações geográficas são pensadas, como os dados são coletados e compilados, tornando comuns tarefas antes impossíveis com mapas tradicionais.

Cada uma destas informações, construídas na forma de camadas, possui, portanto, limitações de análise inerentes à sua própria construção, sendo o SIG uma ferramenta importante na integração, inter-relacionamento e validação destas informações (Briggs, 1992).

Neste sentido, a aplicação de SIG alcança maiores metas através de uma ou mais das seguintes atividades com dados espaciais (Bonham-Carter, 1994):

- organização: em virtude do alto volume de informações envolvidas na maioria dos estudos que envolvem informação espacial, os dados devem ser arranjados de maneira que a informação útil possa ser facilmente extraída. A localização espacial é a principal característica na organização de dados em SIG. Embora os dados possam ser também organizados segundo suas características não espaciais. A eficiência na organização dos dados afeta as demais atividades, assim sendo, é de fundamental importância.

- visualização: a visualização revela padrão entre coleções de itens e dados organizados. Muitas informações são ininteligíveis quando apresentadas sob tabelas de números, ao passo que, quando essa mesma informação se é apresentada em forma de mapa, há uma maior facilidade na compreensão da mesma devido aos padrões da distribuição espacial que são facilmente revelados graficamente.

- relacionamento espacial: atividade complementar à visualização de dados. Definem como as entidades se relacionam entre si e entre as demais. Compreendem os conceitos de topologia, de medida e de direção. São exemplos de relacionamentos espaciais, entre outros: encontrar características sobre um mapa para identificá-lo, selecionar características próximas a outras, encontrar características que estejam parcial ou totalmente dentro de certas áreas, trabalhar com características que foram selecionadas.

- combinação: a compreensão e interpretação de fenômenos espaciais, muitas vezes, estão associadas a um conjunto de dados espaciais de fontes diversas. Quando

combinados, esse conjunto de dados favorece o entendimento de certos fenômenos que não são aparentes ao considerar apenas camadas de dados espaciais isoladas. O processo de combinar *layers* (camada de informação) utiliza operações aritméticas e lógicas, também conhecido como álgebra de mapas. Vários mapas e dados de tabelas podem ser combinados em um único passo de processamento, importante característica dos SIG.

- análise espacial: processo de compreender o significado de dados espaciais. A análise espacial é apoiada em SIG através de visualizações, medidas, cálculos estatísticos, modelos, organização de mapas e tabelas. A análise de dados espaciais em SIG implica compreender questões envolvendo localização espacial, ou seja, a distribuição espacial de fenômenos.

- predição: os projetos desenvolvidos em SIG apresentam como principal proposta à combinação de dados espaciais, objetivando descrever e analisar interações para fazer previsões, através de modelos empíricos que fornecem apoio à definição de classes, unidades ou sítios de interesse. Envolve o uso de mapeamento algébrico para gerar modelos utilizados em prognósticos de problemas. Esses modelos envolvem um conjunto de exercícios para explorar resultados de eventos com o propósito de examinar o desempenho dos referidos modelos (calibração). As ferramentas de modelagem em SIG, além de recuperar e apresentar a informação, fornecem o meio para usar dados espaciais na resolução do problema.

Essas funcionalidades fazem dos SIG ferramentas de uso geral para a descrição e análises da informação geográfica, Assim, estes sistemas podem ser considerados Sistemas de Apoio à Decisão Espaciais (SADE), quando utilizados para apoiar decisões que atendam as necessidades específicas de determinados problemas.

2.4.2 Modelos de dados espaciais

A representação de dados espaciais obedece um formalismo especificado por um conjunto de objetos definíveis, chamados pontos, linhas, áreas e superfícies, de modo que eles possam ser editados, medidos, analisados e reproduzidos dentro de uma estrutura computacional definida.

Rufino (2004) esclarece que um SIG é uma estrutura computacional especificamente destinada a operar sobre dados de diferentes origens e produzir ganho

de conhecimento ou informação sobre as relações espaciais neles eventualmente identificáveis.

Os SIG utilizam arquiteturas que oferecem modelos de dados adequados para representar a realidade e sobre o qual gerenciam os dados geográficos. Estes modelos permitem estratificar a informação geográfica em um conjunto de níveis denominados de planos de informação (PI) ou layer (Figura 3).

Há dois métodos fundamentais de representação do espaço geográfico: modelos de dados vetoriais e modelos de dados matriciais (*raster*). Incorporados a estes, existem também os modelos que representam superfícies.

Os modelos de dados vetoriais são abstrações gráficas nas quais pontos, linhas e polígonos são usados para representar de forma simplificada objetos do mundo real fornecendo posições espaciais específicas de forma explícita. Os pontos são um conjunto simples de coordenadas (x e y), as linhas são seqüências conectadas de pares coordenados e os polígonos ou áreas são seqüências de linhas interconectadas cujo primeiro e último ponto coordenadas coincidem. Uma nova estrutura não topológica de dados que armazena a geometria e informação de atributo para características geográficas em um conjunto de dados são os *shapefile* (Tibúrcio, 2006). Shapefile é um dos formatos base do ArcGIS e é criado pelo mesmo em qualquer operação de análise espacial. Estes arquivos são extremamente simples de trabalhar, não dispendo de estrutura topológica para armazenamento da localização geométrica das entidades geográficas e da informação descritiva respectiva, armazenando a informação geograficamente referenciada em vários ficheiros distintos. Também é possível converter grande número de formatos de informação georeferenciada, por exemplo, os desenhos CAD, em shapefiles.

Nos modelos de dados raster, o espaço geográfico é representado por grades discretas na forma de células, ou seja, as entidades são representadas por uma série de células de grades conectadas. Através de sistemas baseados em grades é possível utilizar funções que facilitam o processo de modelagem, especialmente aquelas envolvendo operações de sobreposição e superfícies, pois estas operações são realizadas “pixel a pixel”. Uma desvantagem marcante deste tipo de estrutura é a redução de precisão espacial, diminuindo a confiabilidade em medidas de áreas e de distâncias.

As superfícies são modelos fundamentais em estudos envolvendo SIG. Elas podem ser representadas vetorialmente (modelos de grade irregular) ou em modelos raster (modelos de grade regular).

Em modelos de grade irregular (Triangular Irregular Network - TIN) os pontos amostras são conectados por linhas para formar triângulos. Assim, diferentemente da geração de grade regular, os valores de cota dos vértices dos elementos triangulares da malha triangular não precisam ser estimados por interpolações. Segundo Felgueiras (2001) na construção deste tipo de modelo é muito importante que as características da superfície sejam preservadas. Assim, é interessante que o conjunto de entrada amostral seja bastante representativo.

O processo de geração de modelos em grades regulares consiste em estimar os valores de elevação de cada ponto da grade a partir do conjunto de amostras de entrada. Assim são utilizados de interpolação para o cálculo de elevação de cada elemento da grade. São exemplos de interpoladores para geração de grade regular: interpoladores de tendência; média móvel, etc.

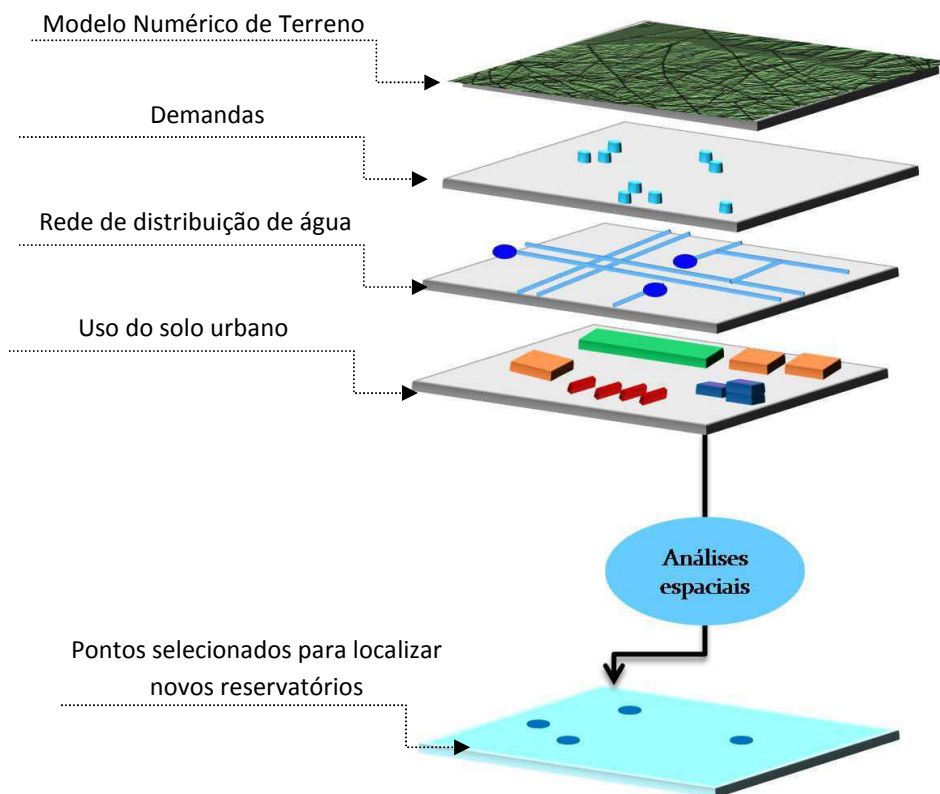


Figura 3: Exemplo da organização da base de dados em planos de informação em um SIG para análises espaciais de SAA

Neste contexto, um Modelo Numérico de Terreno (MNT) é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre. Dados de relevo, informação geológicas, levantamentos de profundidades do mar ou de um rio, informação meteorológicas e

dados geofísicos e geoquímicos são exemplos típicos de fenômenos representados por um MNT.

Dentre alguns usos do MNT pode-se citar (Burrough, 1986):

- Armazenamento de dados de altimetria para gerar mapas topográficos;
- Análises de corte-aterro para projeto de estradas e barragens;
- Elaboração de mapas de declividade e exposição para apoio a análise de geomorfologia e erodibilidade;
- Análise de variáveis geofísicas e geoquímicas;
- Apresentação tridimensional (em combinação com outras variáveis).

Felgueiras (2001) explica que processo de geração de um modelo numérico de terreno pode ser dividido em três etapas: aquisição das amostras ou amostragem, geração do modelo propriamente dito ou modelagem, utilização do modelo ou aplicações.

As fontes mais comuns de amostras de modelos de elevação de terreno são: arquivos digitais, importados de outros sistemas; bases topográficas com isolinhas e pontos notáveis de máximos e mínimos, levantamentos através de técnicas de aerofotogrametria; levantamentos em campo transformados, de alguma forma, em informação digitais. Para dados de altimetria pode-se, por exemplo, realizar-se levantamentos em campo com o auxílio de GPS (Global Position Systems). Um conjunto de amostras pode ainda ser obtido a partir de pares estéreos de imagens de sensoriamento remoto.

Neste sentido, As principais diferenças na representação de dados vetoriais e matriciais em SIG podem ser observadas na Figura 4.

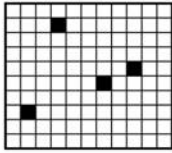

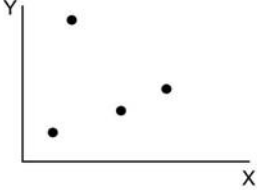
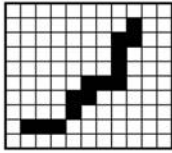

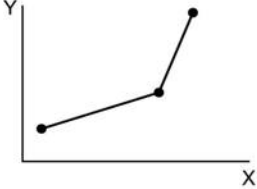
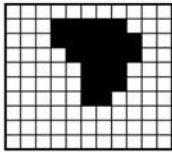
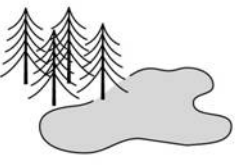
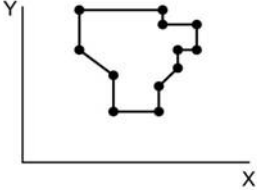
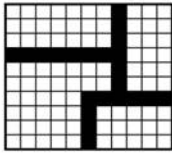
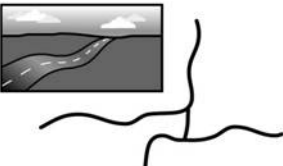
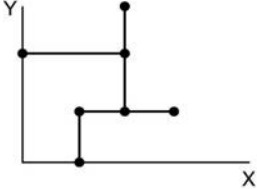
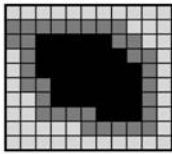

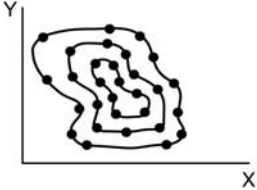
The raster view of the world	Happy Valley spatial entities	The vector view of the world
	 Points: hotels	
	 Lines: ski lifts	
	 Areas: forest	
	 Network: roads	
	 Surface: elevation	

Figura 4: Diferenças entre estruturas de dados vetoriais e matriciais (Heywood & Cornelius, 1998).

2.4.3 Aplicação dos SIG na modelagem e otimização dos SUDA

Como o problema a ser solucionado exige uma decisão que depende diretamente das características espaciais das informações envolvidas, pode-se utilizar o SIG como SADE (Sistema de Apoio à Decisão Espacial), utilizando recursos, tais como: modelagem numérica do terreno, técnicas de análise espacial, integração entre modelos matemáticos, entre outros.

Solano & Sebastián (2002) citam a importância dos SIG no planejamento e gerenciamento dos SAA urbanos e evidencia o grande volume de informações envolvidas neste processo, tais como: *informações sobre usuários, descrição física das infra-estruturas, localização geográfica de usuários e infra-estruturas*, entre outras. Essas

informações, que muitas vezes se apresentam em diferentes formatos e escalas, devem ser gerenciadas por um sistema informatizado que auxilie na tomada de decisão. Com a utilização crescente do SIG tem sido possível relacionar os diferentes planos de informações, de diferentes tipologias e origens, com as componentes espaciais deste complexo sistema. Além disso, a comunicação com outros sistemas faz dos SIG um provedor de dados para ferramentas externas e aumenta a funcionalidade destes sistemas na gestão dos abastecimentos urbanos de água. De forma geral, a Figura 5 apresenta uma estrutura na utilização de um SIG destinado a gestão integral dos SAA.

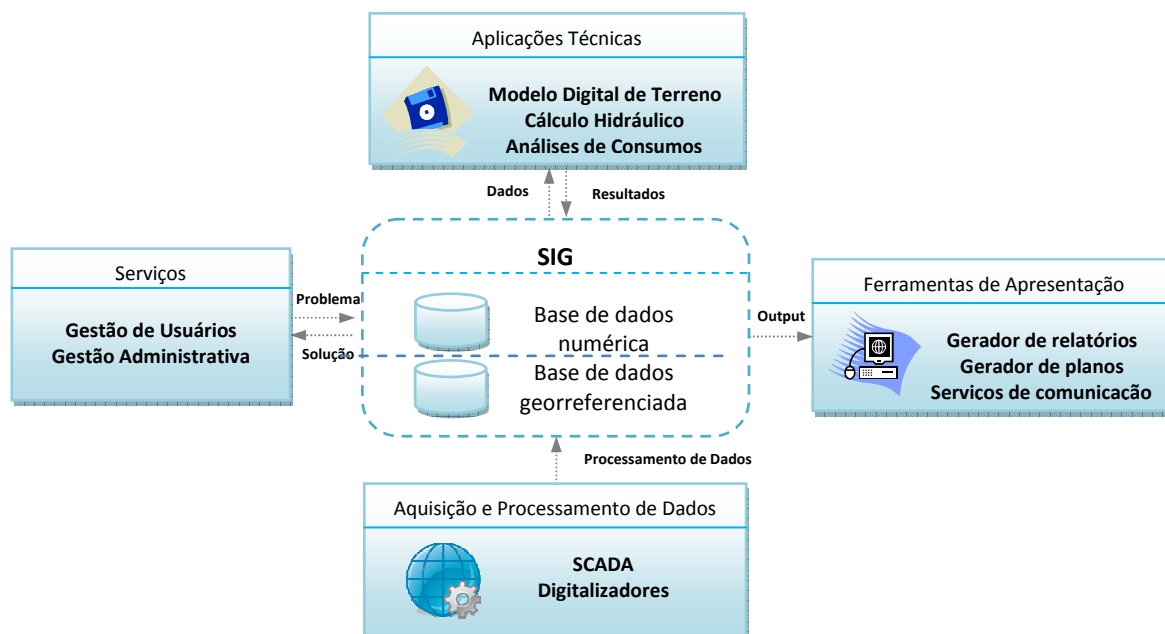


Figura 5: Diagrama ilustrativo de um SIG utilizado no planejamento de um SAA urbano (Adaptado de Solano & Sebastián, 2002)

Longley (2005) discorre sobre a utilização dos SIG enquanto sistema de apoio em planejamento de serviços públicos, principalmente, de serviços urbanos, os quais podem auxiliar na escolha de prioridades e preferências das comunidades usuárias destes serviços.

No domínio da operação e exploração de SAA, um SIG realmente útil deverá apresentar capacidades para manusear simultaneamente informação alfanumérica e cartográfica. Por informação cartográfica entende-se toda e qualquer informação do cadastro do SAA passível de ser representada em cartas ou mapas (por exemplo, rede de condução, reservatórios, válvulas). Informação alfanumérica consiste em registros das características da informação cartografada (por exemplo, identificação do diâmetro, material, classe de pressão das tubulações, tipo de válvulas, entre outros) e outras informações relativas à rede, tais como, identificação de clientes, dados relativos à

operação, dados de faturamento, informações sobre materiais disponíveis em estoque nos armazéns.

Nos dias atuais, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são ferramentas que possibilitam lidar com grandes volumes de informação espacial e não espacial (alfanumérica) e, por esse motivo, têm sido amplamente identificados como ferramentas úteis neste domínio.

2.4.4 Avaliação multicriterial e tomada de decisão em SIG

Os SIG têm sido utilizados como ferramenta de consolidação e análise de grandes bases de dados sobre sistemas de abastecimento de água. Além de permitirem a captura, armazenamento, manipulação, análise e exibição de dados georreferenciados, podem ser utilizados como Sistemas de Suporte à Decisão Espacial, auxiliando em todas as etapas de um processo decisório, para apoio no planejamento e gestão de um SUDA.

Em problemas de disposição espacial de equipamentos, tratados nesta ocasião, através das unidades de reservação dos SUDA, torna-se possível a combinação de diferentes conjuntos de dados, de modo que se obtenham novos resultados e melhor informação sobre a realidade espacial estudada.

A avaliação com múltiplos critérios é um conjunto de técnicas utilizadas na decisão multidimensional dentro do campo de tomada de decisão (Cano & Sendra, 1999). O processo de tomada de decisão com múltiplos critérios pode ser entendida como um mundo de conceitos com aproximações de modelos e métodos para auxiliar gestores, especialistas, técnicos etc. a descrever, avaliar, ordenar, selecionar objetos com base em uma avaliação expressa por valores de preferência de acordo com vários critérios (Malczewski, 1996).

Existem, entretanto, diferentes técnicas de análise ou inferência espacial que permitem a produção de novos mapas a partir de dados já existentes. Inferência Espacial pode ser entendida como a geração de planos de informação a partir da combinação de um conjunto de dados de entrada, resultando em um novo dado de saída (Rufino, 2004).

O conjunto de dados de entrada podem ser baseados em modelos teóricos, de princípios físicos ou químicos e modelos empíricos, baseado em de dados observados e em conhecimento acumulado (Câmara *et al*, 2002).

Os modelos empíricos podem ser baseados em conhecimento, que são implementados a partir do conhecimento de especialistas e baseados em dados, que são

implementados a partir de um conjunto de dados observados. Nestes modelos, diferentes técnicas de inferência espacial podem ser utilizadas no contexto de produção de novos mapas a partir de dados já existentes.

Nos modelos baseados em conhecimento geralmente são utilizados a análise Booleana, a Média Ponderada e a Lógica Difusa. Nos modelos baseados em dados (quando os dados disponíveis são suficientes para que se possa estimar a contribuição de determinados atributos no processo de modelagem), recorre-se a métodos estatísticos que são aplicados sobre estes dados como os métodos Bayesiano e a inferência por Redes Neurais (Rufino, 2004). São apresentados a seguir os conceitos e definições pertinentes aos modelos baseados em conhecimento, pois os mesmos foram utilizados neste estudo.

2.4.4.1. Modelos baseados em conhecimento

Nestes modelos, são necessárias as informações de entrada e uma metodologia que tome possível descobrir localizações ou zonas que satisfaçam a um conjunto de critérios. Se o critério é definido segundo regras determinísticas, o modelo consiste em aplicar operadores de lógica booleana em um conjunto de dados (mapas) de entrada. O dado de saída é um mapa binário onde cada ponto no mapa, satisfaz ou não as condições do modelo (Bonham-Carter, 1994).

Por outro lado, as localizações podem ser analisadas de acordo com critérios ponderados, que resultam em uma escala de potencialidade (Bonham-Carter, 1994). A avaliação do peso a ser atribuído a um mapa depende da análise da importância da evidência em relação a uma ocorrência conhecida ou do julgamento subjetivo de especialistas (Câmara *et al*, 2002).

2.4.4.2 Combinação Linear Ponderada

Mecanismo para avaliar qualitativamente as distintas soluções encontradas de acordo com diversos critérios e considerando determinada hipótese. (Sendra *et al*, 2001).

Neste método cada mapa de entrada será utilizado como uma evidência que receberá um peso diferente dependendo da importância para com a hipótese em consideração. Neste caso cada plano de informação receberá pesos diferentes, bem como as respectivas classes dos planos de informação. O resultado será um mapa com

áreas que expressam um grau de importância relativa através dos valores numéricos de saída. Por exemplo, ao se avaliar riscos a desabastecimento de água em zonas urbanas, observou-se que o critério *distância* (distância do usuário ao reservatório) pode apresentar maior influência que o critério População (número de moradores usuários), e conseqüentemente, no momento da ponderação, o critério Distância receberá maior peso.

Este tipo de análise espacial não apenas considera toda a variabilidade dos dados contínuos, mas oferece também a possibilidade dos critérios compensarem uns com aos outros (Eastman, 1999). Esta compensação é determinada por um conjunto de pesos dos critérios que indica a importância relativa de cada plano de informação.

Muitas vezes os critérios que serão utilizados na análise apresentam-se em unidade e escalas distintas e por isso devem ser normalizados ou adequados, através de funções de normalização, para uma mesma escala ou unidade de trabalho.

2.4.4.3 Normalização e Ponderação de Critérios

Os diferentes critérios utilizados no processo de tomada de decisão para valorar as alternativas podem está expressos em diferentes unidades e/ou escalas. Portanto antes de realizar as operações algébricas é necessário normalizar ou adequar em uma mesma unidade e/ou escala todos os critérios envolvidos na análise. Os critérios, representados por planos de informações, são padronizados para uma escala contínua de aptidão (de menos apto a mais apto). Normalizando os fatores para uma escala contínua torna-se possível a comparação e a combinação desses critérios. Neste tipo de análise, pode-se usar o conceito de *conjuntos difusos* para definir o limite entre o apto e inapto para os fatores. Esse conceito de conjuntos difusos foi proposto por Zadeh (1965).

Nos processos de avaliação de alternativas é necessário ponderar cada um dos critérios definidos. A obtenção destes pesos ou ponderações é, muitas vezes, auxiliada pelo conhecimento especializado além do conhecimento técnico e científico obtidos em normas, legislações, entre outros.

As Figuras 6 e 7 ilustram as etapas de normalização e ponderação de critérios utilizadas na análise com multicriterial. Após normalizados para escalas e unidades comuns, os critérios são ponderados segundo o grau de influência em relação à hipótese formulada.

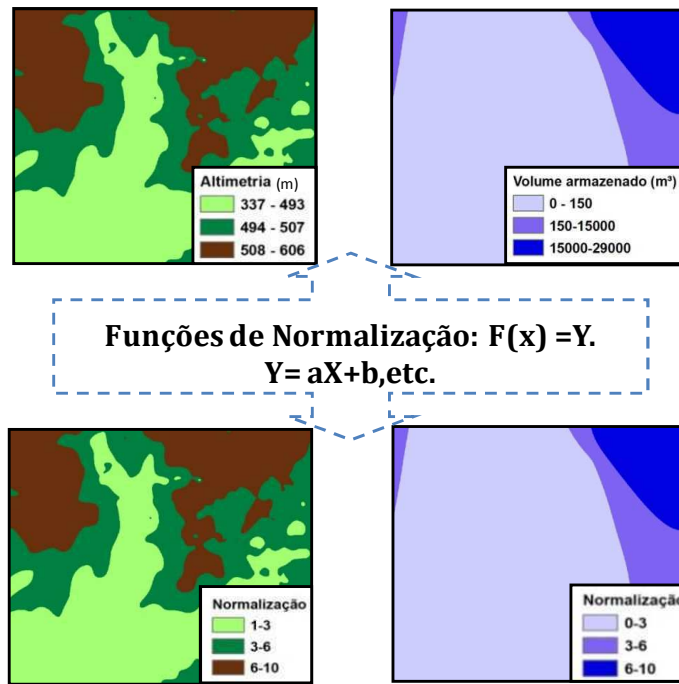


Figura 6: Exemplo esquemático do processo de normalização linear de critérios para uma mesma unidade, segundo um grau de adequação de 0 a 10.

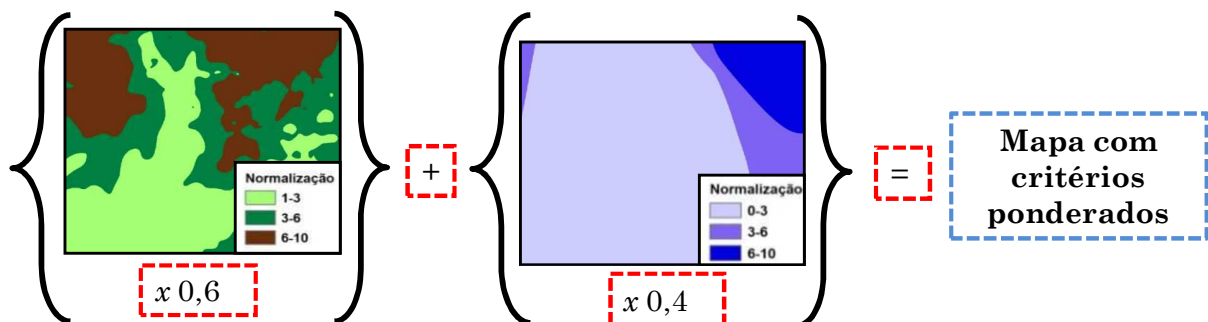


Figura 7: Exemplo esquemático do processo de normalização linear de critérios para uma mesma unidade, segundo um grau de adequação de 0 a 10.

Capítulo 3: Caso de estudo

3.1 Área de Estudo

3.1.1 Localização

A área abordada neste estudo compreende a zona urbana da cidade de Campina Grande, PB, localizada no agreste paraibano na região oriental do Planalto da Borborema a 7°13'11" de latitude Sul e a 35°52'31" de latitude Oeste (Figura 8). Considerada uma das maiores e mais importantes cidades do interior do Nordeste, o município de Campina Grande apresenta uma área que se aproxima de 621 km², enquanto que a zona urbana possui em seus limites 96 km², aproximadamente.

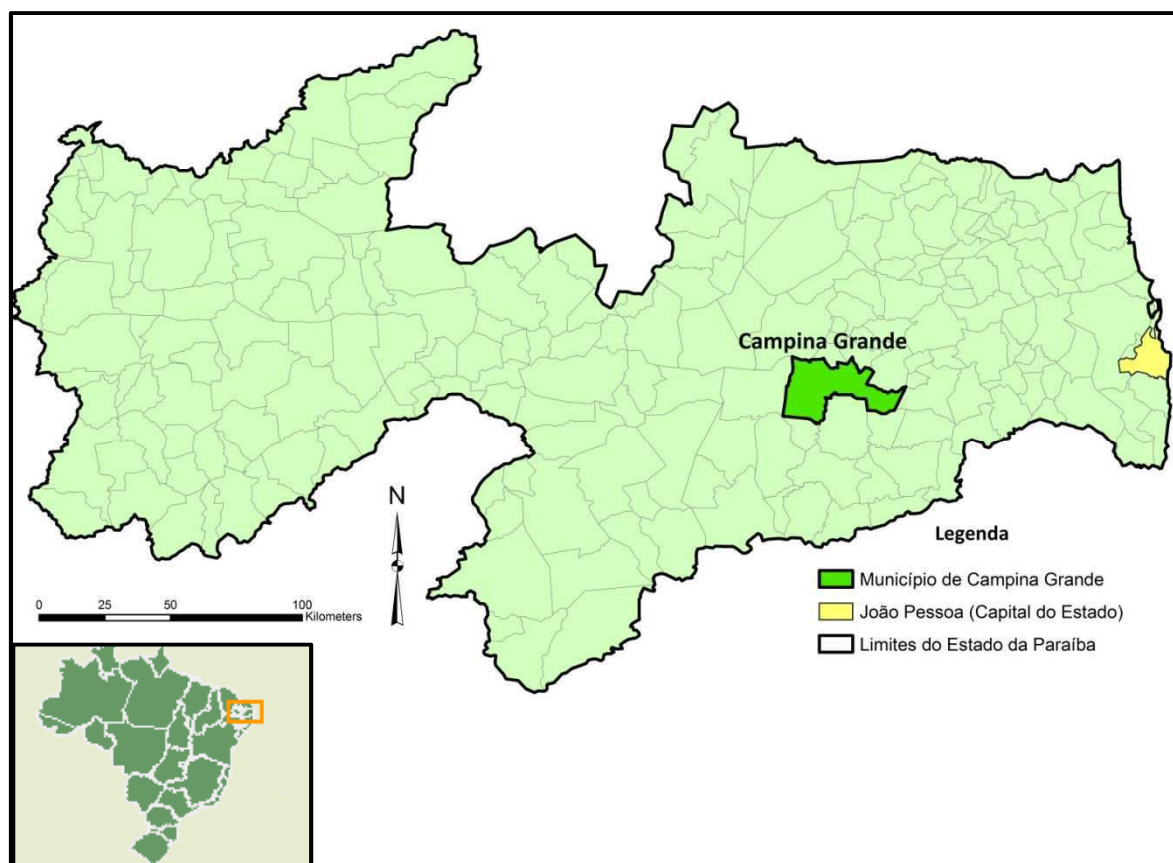


Figura 8: Localização geográfica do município de Campina Grande, PB

3.1.2 Relevo

O município de Campina Grande está inserido na unidade geoambiental do Planalto da Borborema, formada por maciços e outeiros altos, com altitude variando entre 650 a 1.000 metros. Com relevo forte e ondulado, a topografia do Município apresenta curvas de nível variando entre 337 m e 665 m acima do nível médio de mar (Figura 9). O relevo mais acidentado localiza-se a Nordeste, em direção ao município de Lagoa Seca. A Serra do Monte (alinhamento de Inselbergs), ao Sudoeste, separa o município de Campina Grande do de Boqueirão. Ao Sudeste, dois alinhamentos: as Serras de Catuama e de Bodopitá que o separam dos municípios de Fagundes e Queimadas.

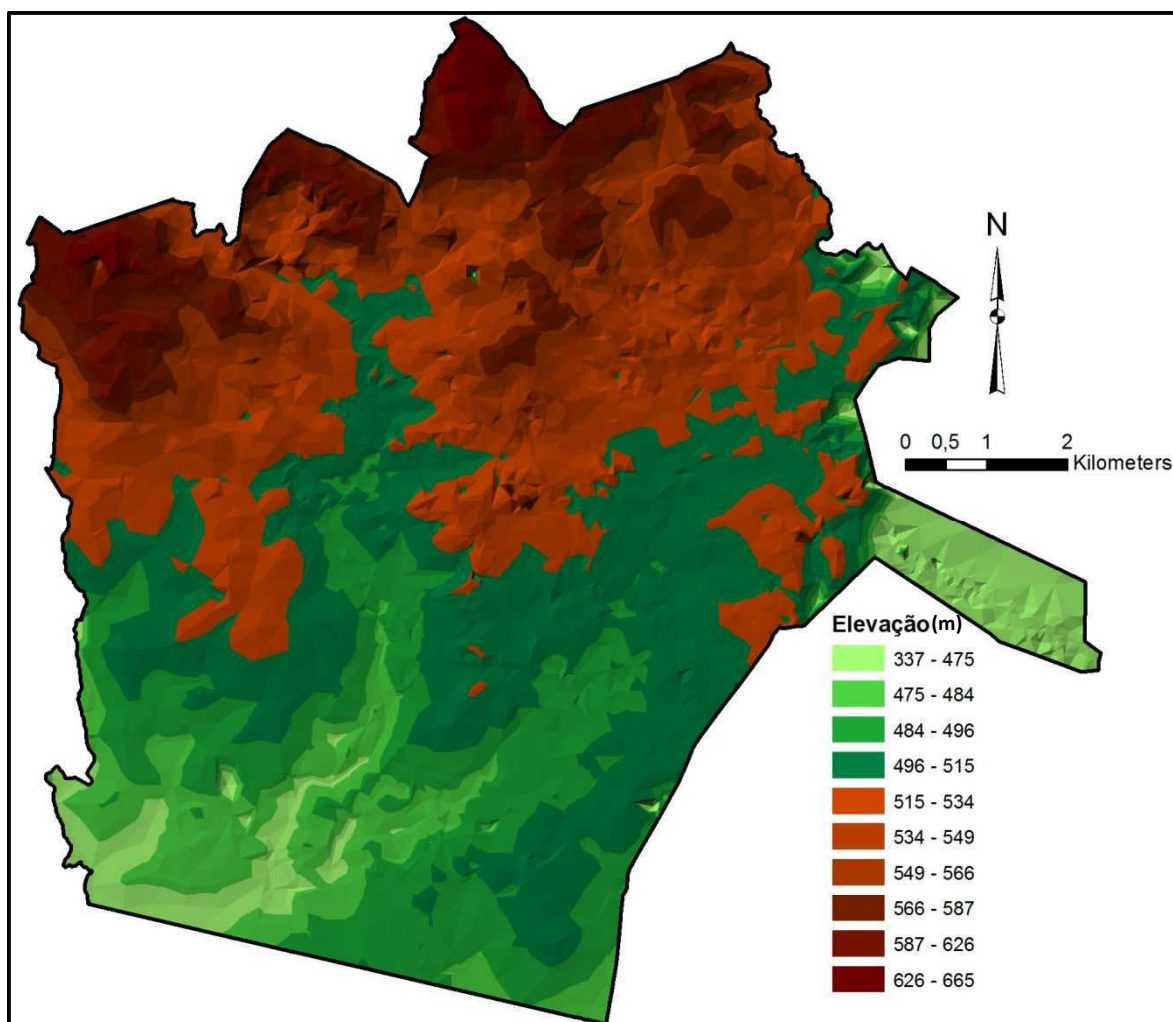


Figura 9: Representação do relevo da cidade de Campina Grande, PB através de Modelo Numérico de Terreno em TIN (elaborado a partir de dados da CAGEPA)

3.1.3 Demografia e Expansão Urbana

Segundo a contagem realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2008), a cidade apresentou uma população de 381.422 habitantes, assim como uma densidade demográfica de 614 hab/km². A população urbana compreende 95,08% do total e a rural detêm 4,92% para o mesmo ano.

O aumento populacional do município ao longo das últimas décadas (Figura 10), ocasionou mudanças na organização do espaço urbano. Muitas vezes, essa mudança ocorre espontaneamente, na ausência de um adequado planejamento.

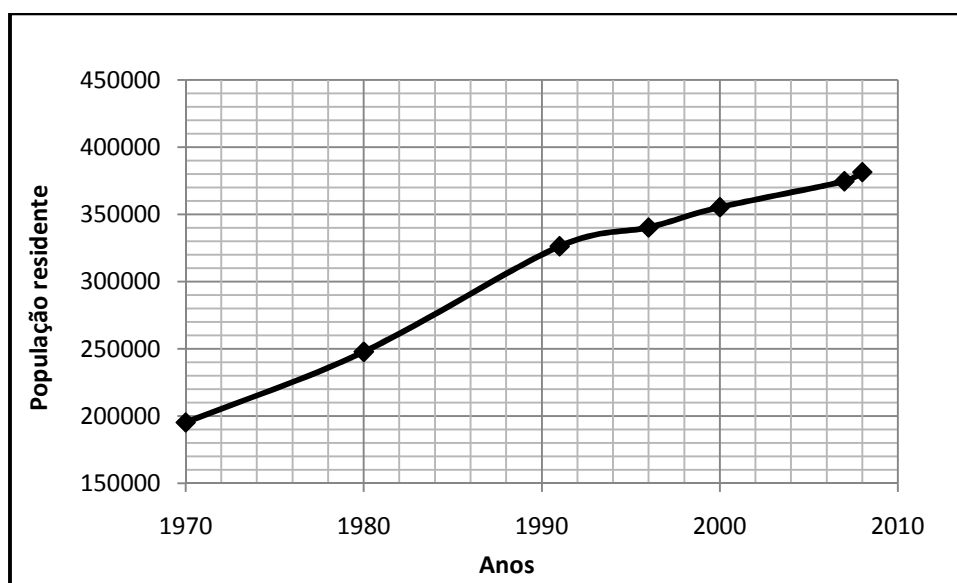


Figura 10: População residente nas últimas décadas em Campina Grande, PB (elaborado a partir de dados do IBGE)

Nos tempos atuais, o crescimento urbano de Campina Grande tem sido marcado pela forte atratividade exercida pela sua função de pólo regional, em razão da posição geográfica estratégica de entreposto entre a Região do Cariri, o Sertão e o Litoral Paraibano e enquanto centro universitário e tecnológico de destaque. As correntes imigratórias de população da área rural, também impulsionaram o crescimento da sua mancha urbana, registrando-se intensa e rápida transformação de glebas rurais em loteamentos urbanos na periferia da cidade com variações bastante significativas nas diversas localidades de sua malha urbana, típica de uma estrutura sócio-espacial segregada.

Segundo Carvalho & Scocuglia (2008) a ocupação e uso do solo urbano em Campina Grande se deram em condições problemáticas, e, como reconhecidamente pela

grande maioria dos municípios brasileiros, o município passa a conviver com um quadro urbano que se caracteriza pela precariedade do processo de planejamento e gerenciamento. A Figura 11 exibe em números como ocorreu o crescimento na taxa de urbanização nas últimas décadas em Campina Grande, PB.

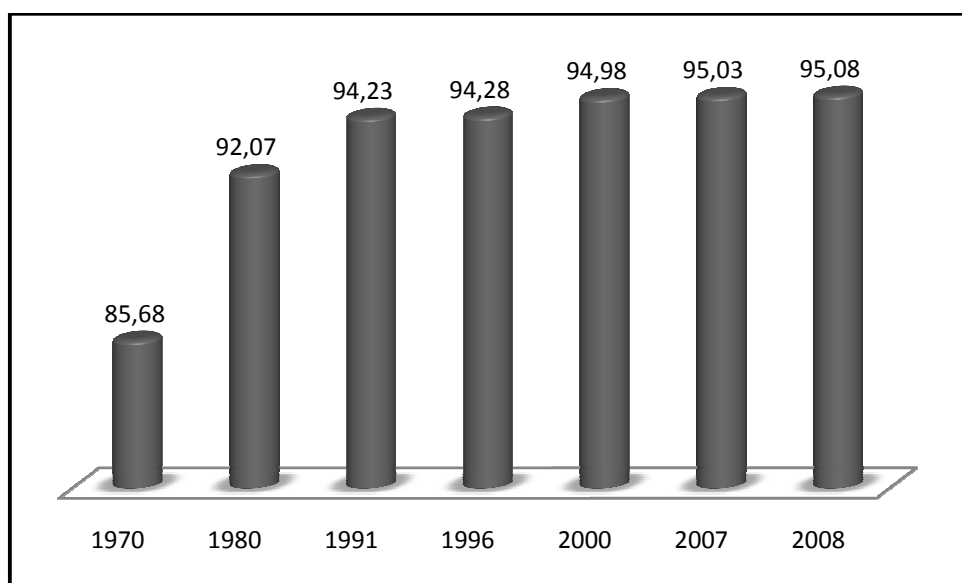


Figura 11: Taxa de urbanização ao longo das últimas décadas (elaborado a partir de dados do IBGE)

O intenso crescimento populacional tem exigido um cuidado nas ações de uso e ocupação do espaço urbano, de tal forma que tivessem potencializadas suas características econômicas. Ao longo das duas últimas décadas, a cidade foi acumulando um alto déficit urbanístico: ruas sem pavimentação, falta de um programa habitacional, desestruturação do sistema de transporte público, ampliação de áreas degradadas, surgimento de favelas, frágil estrutura sanitária e ambiental. A falta de estrutura sanitária recai sobre os sistemas de distribuição de água, que muitas vezes, não acompanha a expansão urbana, e desta forma, muitas populações, não tem acesso, ou não recebem esse tipo de serviço de forma adequada, principalmente nas áreas periféricas da cidade. Esses fatos evidenciam a falta de um planejamento integrado do meio urbano como um todo.

No contexto da expansão urbana da cidade é possível observar alguns vetores de crescimento do uso do solo em Campina Grande. A Figura 12 mostra uma evolução no espaço urbanizado entre os anos de 1984 a 2007. Observa-se que os vetores de crescimento predominam na direção sudoeste da cidade.



Figura 12: Evolução no espaço urbano (1984-2007) e vetores de crescimento na cidade de Campina Grande, PB

3.2 O Sistema Urbano de Distribuição de Água

Os serviços de abastecimento de água e esgoto sanitário da cidade são realizados pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), empresa estatal de economia mista, em operação no âmbito do Estado. Localmente esta empresa opera com três adutoras do açude Epitácio Pessoa (mais conhecido como Boqueirão), o qual faz parte da Bacia hidrográfica do rio Paraíba. A rede de distribuição de água na área urbana de Campina Grande possui capacidade de reserva de 59.270m³ de água, totaliza aproximadamente 540km de comprimento, com diâmetros variando de 50mm a 800mm e contabiliza 16 reservatórios em operação, além de 5 reservatórios que abastecem distritos vizinhos, os quais não estão sendo considerados neste estudo.

Após a captação, a água é bombeada para Estação de Tratamento na cidade de Gravatá, PB por meio das três adutoras mencionadas (500 , 700 e 800mm). As adutoras de 500mm e 800mm aduzem para o reservatório R9, principal reserva de água do sistema, com capacidade de 29.000m³. A adutora de 700mm aduz água diretamente para o reservatório R5.

Além de abastecer o centro urbano de Campina Grande e seus distritos, o sistema adutor do açude Epitácio Pessoa serve ainda outras localidades; algumas vezes, com derivações direto das adutoras (Barra de Santana, Curralinho, Caturité, Queimadas); outras vezes com derivações da própria rede de Campina Grande, (Lagoa Seca, Matinhas); e ainda, integrado a sistemas de menor porte (Alagoa Nova, integrado ao açude Camará; Esperança e Remígio, integrado aos açudes Vaca Brava I e Vaca Brava II).

De forma esquemática, a Figura 13 mostra o abastecimento de água em Campina Grande e outras localidades anteriormente citadas. Outras características das unidades de reservação responsáveis pela distribuição atual de água em Campina Grande podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1: Principais características das unidades de reservação do SUDA da cidade de Campina Grande, PB (elaborado a partir de informações da CAGEPA)

Reservatórios	Cota Max (m)	Cota Mín (m)	Capacidade (m ³)	Tipo	Zona de Pressão	Estação Elevatória
R1	563	560	3080	Apoiado	B	EE1 - R7
R2	554.8	562	2290	Apoiado	B	
R4	607.34	602.34	10000	Apoiado	C	EE8 - Rede
R5	567	563	8000	Apoiado	B	EE2 - R4
R6	530.5	524.7	2400	Apoiado	A	EE6 - R6
R7	616.359	612.56	200	Elevado	C	EE7 - R7
R9	554	548.5	29000	Apoiado	A	
R10	571	566	2000	Apoiado	D	EE3 - R10
R11	616.5	613	250	Elevado	D	EE3 - R11
R12	623	620	200	Apoiado	D	
R13	665	662	250	Elevado	D	EE3 - R13
R14*	704.5	699	699	Elevado	D (S. José da Mata)	EE4 - R14
R15	517.5	513	350	Apoiado	A6	
R17*	509	504	600	Elevado	A (D. I. Queimadas)	D. I. Queimadas
R18	551	546	200	Elevado	D	EE5 - R18
R19	511	506	250	Elevado	A	
R20*	378.88	373.88	150	Elevado	A (Galante)	
R22*	-	-	250	Elevado	D (Pocinhos)	
R23*	546	552	250	Elevado	D (Velame)	
R28	-	-	500	Elevado	A	
R29	683	677	300	Elevado	C	

* abastecem distritos (fora da zona urbana); -: sem informação, D. I.: distrito industrial.

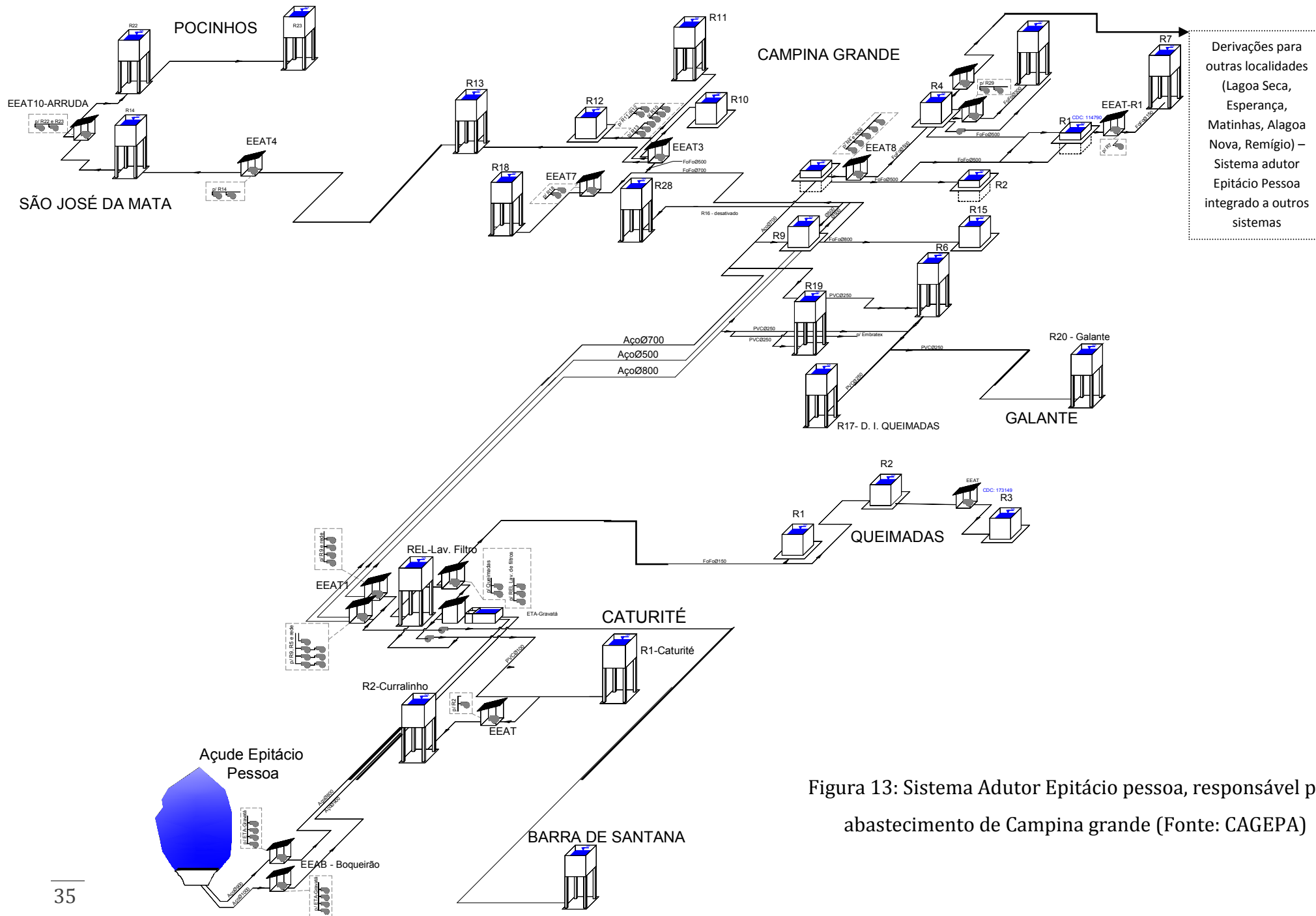


Figura 13: Sistema Adutor Epitácio pessoa, responsável pelo abastecimento de Campina grande (Fonte: CAGEPA)

Em planejamento de abastecimentos de água, as informações relativas ao consumo de água se tornam significantes, visto que, partindo do histórico dos consumos é possível analisar as probabilidades de ampliação da rede de distribuição e, conseqüentemente, dos elementos que a constitui. Neste sentido, segundo informações da CAGEPA, no ano de 2007 houve um consumo médio mensal faturado de aproximadamente 1.321.039 m³ incluindo todos os usos: residencial, industrial, comercial, público e misto. No primeiro trimestre de 2008 esse valor subiu para 1.335.341m³. Para o mesmo ano de 2007 houve um aumento médio de 220 ligações de água por mês. Em 1995 existiam um total médio de 70.000 ligações. Portanto, em pouco mais de 10 anos o número de ligações de água na cidade aumentou em 40%. Esses números evidenciam que o sistema estudado se encontra em continua expansão, causada principalmente pelo aumento populacional. A Tabela 2, elaborada a partir de dados da CAGEPA, apresenta uma síntese do comportamento do consumo de água em Campina Grande no ano de 2007, além do número de ligações existentes.

Outro aspecto que pode ser analisado é a capacidade de armazenamento de água, que somam 59.270m³, em razão do consumo diário 44.034m³. Esses números podem indicar que, para satisfazer as demandas, as unidades de reservação operam com pequenas folgas, pois esta capacidade de armazenamento ainda atende a outras localidades (cidades vizinhas e distritos). Verifica-se, portanto, que há indícios de saturação do sistema.

Os consumos específicos de água, em geral, crescem com o aperfeiçoamento do nível de vida e com o desenvolvimento do núcleo urbano. Quanto maior o tamanho, maiores as demandas industriais e comerciais de uma dada localidade. Outros fatores sociais, econômicos, climáticos e técnicos podem influir nesses consumos específicos. Muitos sistemas vêm apresentando deficiências operacionais sejam pelo elevado aumento da demanda nos últimos anos ou pela falta de manutenção adequada. Os aumentos nas interrupções do fornecimento de água são cada vez mais comuns, gerando assim insatisfação de seus usuários (Silva *et al*, 2004).

Tabela 2: Consumos e ligações do SUDA em Campina Grande, PB.

Usos	jan/07		fev/07	
	Ligações	Consumos (m ³)	Ligações	Consumos (m ³)
Residencial	88.920	1.098.376	89.251	1.102.780
Comercial	3.518	81.433	3.520	79.288
Industrial	214	78.707	207	64.410
Público	990	75.142	985	78.942
Misto	669	25.330	665	23.186
Total	94.311,00	1.358.988,00	94.628	1.348.606
	mar/07		abr/07	
Residencial	89.421	1.064.167	89.530	1.116.995
Comercial	3.539	75.342	3.535	79.047
Industrial	212	74.760	213	79.169
Público	996	80.985	1.000	87.425
Misto	669	23.567	657	25.469
Total	94.837	1.318.821	94.935	1.388.105
	mai/07		jun/07	
Residencial	89.363	1.023.492	89.833	1.251.005
Comercial	3.522	73.148	3.540	88.906
Industrial	218	71.159	219	80.033
Público	996	78.322	993	81.319
Misto	655	23.684	645	23.064
Total	94.754	1.269.805	95.230	1.524.327
	jul/07		ago/07	
Residencial	89.984	927.606	90.046	983.047
Comercial	3.515	72.197	3.523	72.213
Industrial	220	66.859	219	65.516
Público	994	71.445	998	77.889
Misto	641	23.470	641	23.003
Total	95.354	1.161.577	95.427	1.221.668
	set/07		out/07	
Residencial	90.575	998.288	90.949	1.027.429
Comercial	3.538	73.525	3.561	77.717
Industrial	224	66.288	223	67.562
Público	1.003	77.415	1.007	78.598
Misto	640	23.346	634	23.202
Total	95.980	1.238.862	96.374	1.274.508
	nov/07		dez/07	
Residencial	91.036	1.108.521	91.303	1.097.620
Comercial	3.543	82.360	3.572	79.553
Industrial	219	78.549	221	78.527
Público	1.002	86.676	1.012	87.270
Misto	633	25.213	631	22.920
Total	96.433	1.381.319	96.739	1.365.890

Neste contexto, Campina Grande apresenta, como anteriormente comentado, alguns aspectos significantes, tais como: considerável crescimento urbano, relevo acidentado, descontinuidade no abastecimento em algumas zonas da cidade, diferenças relevantes de pressões entre pontos próximos e, ainda, a não utilização por parte dos especialistas da concessionária de técnicas de otimização da localização de unidades de reservação. Ressalta-se também, que em virtude da heterogeneidade na ocupação do solo urbano e à acidentada topografia da cidade, é possível que os problemas com o abastecimento de água estejam concentrados em áreas e grupos sócio-espaciais característicos.

Atenta-se também para o fato de que o horizonte de projeto da última ampliação do sistema em operação era para o ano de 2005, motivo que indica uma necessidade urgente de avaliações e possíveis modificações do SUDA como um todo.

Sabe-se que investimentos derivados do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) do Governo Federal Brasileiro para o estado da Paraíba serão aplicados na ampliação do sistema adutor Epitácio Pessoa. Serão investidos 15,6 milhões com verba federal e 2,6 milhões de reais com verbas do Estado, somando um total de 18,2 milhões de reais. Esses recursos irão favorecer um trabalho que a CAGEPA vem desenvolvendo desde 2003, que é a intensificação dos investimentos nos projetos de ampliação e implantação do abastecimento de água, coleta e tratamento de esgotos, através do programa “Boa Nova”. Serão beneficiados os municípios de Campina Grande, Alagoa Nova, Pocinhos, Lagoa Seca, Matinhas e São Sebastião de Lagoa de Roça, além dos distritos de Galante e de São José da Mata. Estima-se que a implantação da nova adutora pode assegurar o abastecimento de água dos municípios beneficiados até 2030. Não obstante, todo esse processo de ampliação deve incidir baseando-se em critérios eficientes de planejamento.

Capítulo 4: Metodologia

4.1 Considerações iniciais

As perspectivas de planejamento de abastecimentos de água entre alternativas de ampliação da capacidade de atendimento e crescentes demandas, consubstanciadas pela expansão urbana, são atributos que vêm sendo associados a uma visão mais recente de gestão da água. Iniciativas voltadas para otimização da disposição espacial de elementos, controle de perdas, otimização do uso de energia elétrica, entre outros, contrapostas à postura convencional de ampliar as capacidades estruturais de distribuição de água, constituem elementos de planejamento que cada vez mais se aplicam aos Sistemas Urbanos de Distribuição de Água.

Neste contexto, incertezas inerentes ao processo de tomada de decisões, aliadas ao alto volume de informações envolvidas, fazem dos Sistemas de Informação Geográfica um instrumento de consolidação e análise de grandes bases de dados na fase de planejamento dos referidos sistemas.

Diante de toda a discussão acerca da disposição espacial mais adequada de equipamentos utilizando os SIG como SADE e considerando como problema de estudo as unidades de reservação que compõem o SUDA da cidade de Campina Grande, PB, este estudo se baseia em duas etapas: a proposição de efetuar um diagnóstico da situação atual, a fim de verificar riscos a desabastecimento e a indicação de zonas para a disposição ou localização de novas unidades de reservação.

O modelo conceitual, formulado a partir de pesquisas bibliográficas, levantamento de dados e diálogos com especialistas, busca sistematizar a representação de fenômenos do mundo real através de um conjunto de conceitos formais com os quais as entidades geográficas podem ser modeladas. A formulação do modelo conceitual origina alternativas que representam possibilidades de análises do problema. A modelagem conceitual direciona a implementação, pois o mesmo descreve um “passo a passo” das alternativas que serão analisadas.

O modelo espacial busca consolidar as alternativas propostas na modelagem conceitual, por conseguinte, permite a visualização estruturada do problema como um todo.

Neste sentido, o estudo do problema proposto adotou as seguintes etapas metodológicas:

- I. Revisão bibliográfica;
- II. Aquisição de dados disponíveis;
- III. Modelagem conceitual e espacial

A Figura 14 apresenta uma síntese dos procedimentos metodológicos, apresentados subsequentemente.

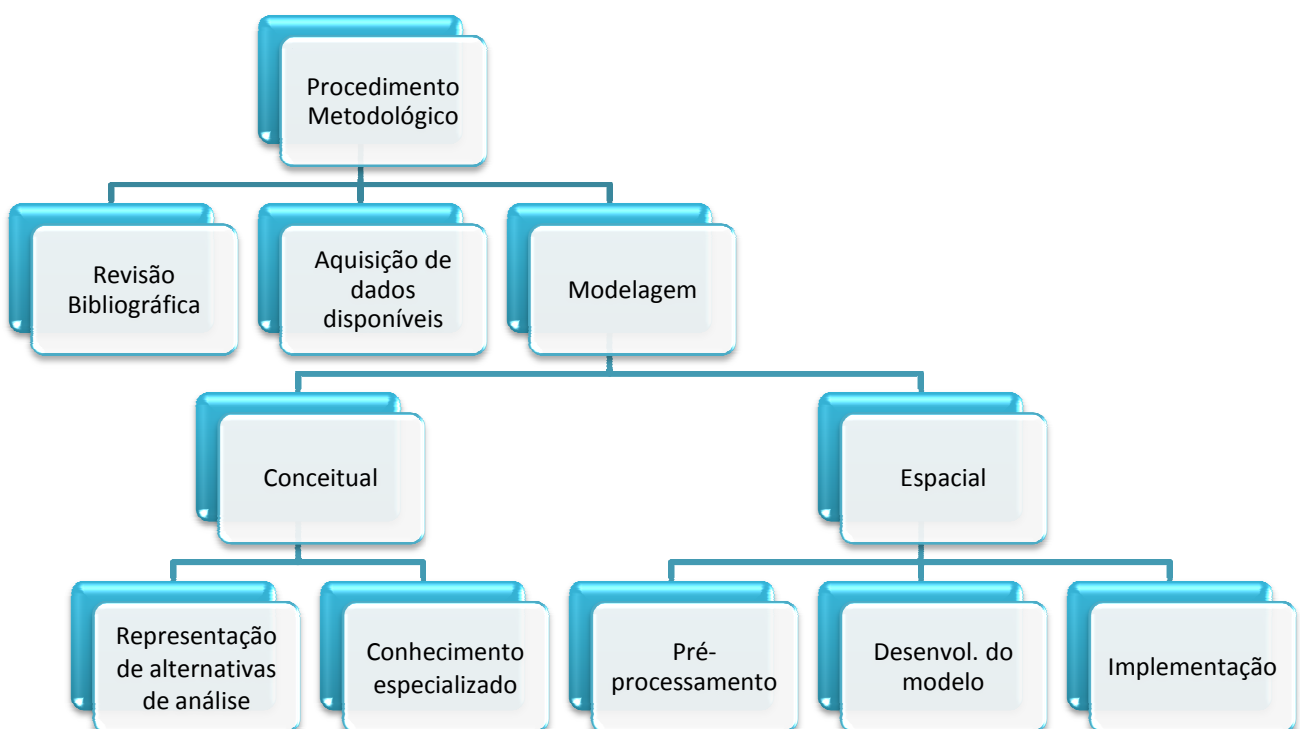


Figura 14: Modelo esquemático dos procedimentos metodológicos

4.2 Aquisição de dados

Nesta etapa metodológica são agrupados todos os dados relevantes, independentes de seus formatos e tipologias, bem como, são consultadas publicações, que apresentem informações relevantes, instituições públicas ou privadas, entre outros. Em seguida, os dados coletados devem ser estruturados em uma base de dados eficiente, a qual, vem a

favorecer a organização destes. Adverte-se que esta etapa afeta diretamente nas demais atividades que fazem parte da resolução de um problema utilizando SIG.

Após definidos os tipos de dados e as instituições que poderiam disponibilizá-los, foram obtidos, junto à CAGEPA (Companhia de Água e Esgotos da Paraíba), informações sobre altitudes e uso do solo, informações sobre características da rede, em especial aos aspectos relacionados aos reservatórios operados. Obteve-se também uma cópia impressa na escala 1/15.000, onde foi possível identificar a localização dos atuais reservatórios operados, os principais anéis da rede geral e a setorização do sistema em zonas de pressão. Todos esses dados foram lançados na base digital desta pesquisa.

4.3 Modelagem Conceitual

Em planejamento de SUDA é empregado um grande volume de variáveis que devem, por vezes, ser entendidas e interpretadas através de modelos de simulação considerados como ferramentas de apoio à tomada de decisão.

Os modelos conceituais de informações buscam sistematizar a representação de fenômenos do mundo real e possibilitar ao usuário de um sistema informatizado, elencar o conjunto de conceitos formais com os quais as entidades geográficas podem ser modeladas da forma como são percebidas, ou seja, em um alto nível de abstração. Esta abstração possibilita a representação de todas as entidades e os relacionamentos envolvidos no sistema em estudo. A modelagem conceitual ficará independente do programa computacional utilizado.

Neste sentido, em uma pesquisa que envolve várias camadas de informação e um alto volume de dados, o modelo conceitual deve descrever nitidamente as informações utilizadas, simplificar o problema real apresentado, além de auxiliar na organização dos dados envolvidos.

Em Sistemas de Informação Geográfica, toda informação é gerada a partir da modelagem conceitual dos dados (Figura 15). Um modelo pode simplificar sistemas complexos e facilitar seu entendimento. A modelagem conceitual dos dados em um SIG auxilia na tomada de decisão, pois funciona como um “filtro” que ajuda a extrair a informação relevante a partir de um grande e complexo volume de dados (Burrough, 1995). Estes modelos podem ser desenvolvidos baseados no conhecimento de

especialistas ou em análises quantitativas (padrões pré-estabelecidos pela literatura ou por medições), ou ainda uma combinação de ambos (Green, 1999).

O modelo conceitual foi elaborado a partir das seguintes atividades: pesquisa bibliográfica, levantamento de dados, visitas de campo, consultas a especialistas. Em seguida elencaram-se alternativas, as quais representam possibilidades de análises de problema tratado.

Nesta abordagem, a análise deve se concentrar no conjunto de critérios a serem avaliados. Os critérios podem ser definidos como atributos mensuráveis das alternativas a serem consideradas. As restrições são critérios que limitam a análise (Eastman, 1999).

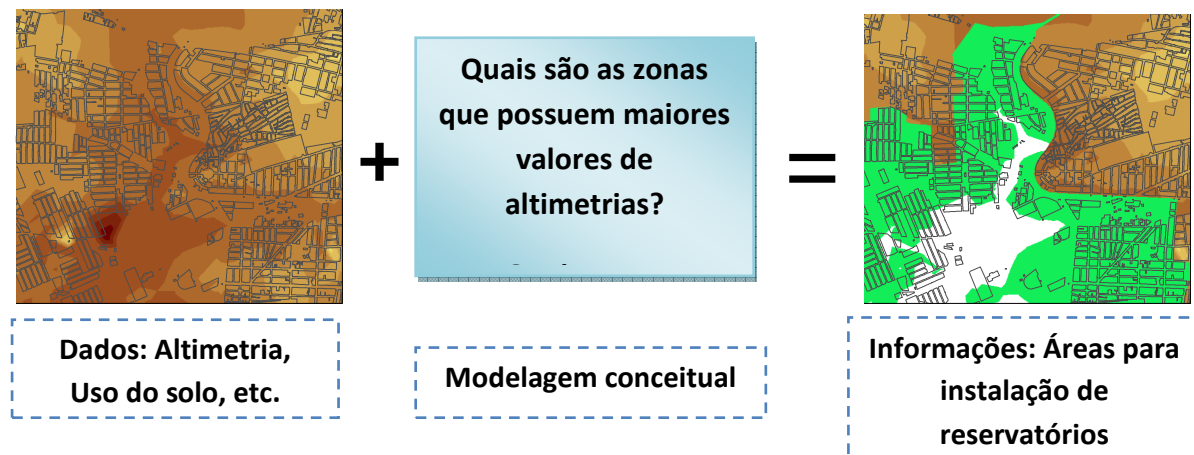


Figura 15: Aspecto esquemático de uma informação gerada em um SIG

4.3.1 Avaliação de critérios

O planejamento de SUDA demanda decisões que envolvem uma variedade de critérios que podem ser representados como planos de informações espaciais (proximidade aos reservatórios, distâncias a áreas residenciais e industriais, diferença de altitude entre reservatório e usuário, etc.). Esta grande quantidade de critérios requer um tipo de consulta ao banco de dados em um SIG que será baseada em mais de um atributo. Este tipo de análise pode ser denominado de Avaliação Multicritério ou em Inglês MCE (Multi-Criteria Evaluation) ou ainda MCDM (Multi Criteria Decision Making) e pode ser entendida como um conjunto de métodos que permitem o tratamento simultâneo de aspectos econômicos, sociais, políticos, ambientais, entre outros, em um processo de tomada de decisão (Braga & Gobetti, 1997).

A análise multicriterial espacial representa uma aplicação especial das técnicas convencionais de análise multicriterial por considerar a componente espacial dos dados

envolvidos. Pode ser entendida como um processo que combina e transforma dados espaciais (entrada) em um resultado decisório (saída). Na terminologia do SIG as alternativas são coleções de pontos, linhas, polígonos (vetor) ou células (raster) associados a valores (atributos).

Qualquer processo de tomada de decisão começa com o reconhecimento e conseqüente definição de um problema. A potencialidade do SIG de armazenar, gerenciar, manipular e analisar dados espaciais oferece um suporte mais eficiente neste estágio da análise multicritério. No caso deste trabalho o problema é estabelecer um diagnóstico da localização atual dos reservatórios de água do SAA de Campina Grande considerando alguns critérios de avaliação.

Uma vez identificado o problema, a análise deve se concentrar no conjunto de critérios a serem avaliados. A bibliografia existente faz uso de terminologias diferenciadas para denominar os critérios utilizados na avaliação. Os *critérios* podem ser definidos como atributos mensuráveis das alternativas a serem consideradas, que podem ser combinados e avaliados na forma de uma regra de decisão (Eastman, 1999). Nesta abordagem, *restrições* são critérios que limitam a análise, diferenciando as alternativas que são adequadas das que não são adequadas.

4.3.1.1 Altimetria

Segundo Tsutiya (2006) a altimetria é um dos critérios de maior importância para a concepção de sistemas de abastecimento de água.

Dentre outras variáveis, as pressões requeridas no sistema de distribuição estão diretamente relacionadas ao fator altimetria. A seleção do tipo de reservatório (apoiado, elevado, semi-enterrado) está relacionada às pressões necessárias ao adequado funcionamento do sistema e conseqüentemente as características altimétricas da região.

Deste modo, a altimetria é fator determinante na operação de sistemas existentes, assim como nos projetos de abastecimentos de água.

4.3.1.2 Distâncias

As distâncias possuem notável influência entre serviços oferecidos (oferta) e usuários que utilizam esses serviços (demanda). Por certo, quanto mais distante a zona

de oferta, maior será o esforço em atender adequadamente a demanda. As unidades de reservação possuem uma área de cobertura ou alcance. Um dos critérios que limitam este alcance é à distância. As distâncias não podem ser excessivamente altas, pois a água ao longo de seu percurso perde energia em virtude de diversos fatores, entre eles: viscosidade da água, singularidades presentes na rede. Muitas vezes, em projetos para implantação de novos reservatórios, podem existir regiões com altimetria que satisfaz as pressões requeridas, no entanto, é suficientemente distante para ocasionar altas perdas de energia, fato que desfavorece o adequado abastecimento.

4.3.1.3 Demandas

Os usuários atendidos representam a demanda potencial que utilizam os serviços de água. O dimensionamento dos diversos elementos que formam um SAA está em função das demandas, as quais quando quantificadas, possibilitam a estimativa de volumes de água que devem ser aduzidos, armazenados e distribuídos. Na ausência de informações mais precisas, a população pode representar a demanda de água potencial e os lotes podem representar a sua localização no espaço urbano.

Além disso, em planejamento de SUDA são necessárias informações sobre zonas desprovidas de água canalizada. Muitas vezes, essas zonas são localizadas na periferia da cidade, fato que explica que muitas vezes o serviço de água não consegue acompanhar a expansão urbana. Essas informações se mostram importantes na avaliação da expansão dos serviços de água para atender novas demandas.

4.3.1.4 Volumes armazenados

São representados pela capacidade de armazenamento dos reservatórios que formam o SUDA. A implantação de novas unidades de reservação está diretamente relacionada à capacidade de armazenamento atual do sistema, pois à medida que a demanda aumenta, se faz necessário aumentar também a oferta a fim de manter a continuidade do abastecimento. Os volumes armazenados são informações pontuais. Nas análises realizadas todas as informações estão espacializadas por meio de grades contínuas. Neste sentido, utilizou-se o processo de interpolação para obter uma

superfície contínua para representar volumes de água armazenados, sendo possível visualizar a variação desse critério ao longo da área estudada.

4.3.2 Alternativas analisadas

Alternativa 1: Realizar um diagnóstico da localização atual dos reservatórios do ponto de vista do atendimento à demanda.

Dentre os lotes ocupados identificar zonas que possam apresentar riscos no abastecimento de água para as áreas de influência de cada unidade de reservação.

- *Hipótese formulada: zonas com riscos a desabastecimento;*
- *Critérios: alturas geométricas, distâncias dos reservatórios aos lotes, população (demanda), domicílios que não possuem água canalizada;*
- *Restrições: demandas potenciais representadas por lotes da ocupação urbana.*
- *Altura Geométrica: obtida através da operação de subtração entre o nível médio de cada reservatório e as cotas altimétricas (MNT) das suas respectivas áreas de influência;*
- *Distâncias: distância euclidiana das unidades de reservação;*
- *População: obtidas através de dados de setores censitários (IBGE, 2000);*
- *Domicílios abastecidos pela rede geral de água: obtidos através de dados de setores censitários (IBGE, 2000).*
- *Considerar as seguintes funções de adequação à hipótese formulada:*
 - *Altura geométrica: quanto menor, mais adequado;*
 - *Distâncias: quanto mais distante, mais adequado;*
 - *População: quanto maior, mais adequado;*
 - *Domicílios abastecidos pela rede geral de água: quanto menor o número de domicílios, mais adequado.*
- *Lotes: Analisar apenas nas áreas com ocupação urbana.*

Alternativa 2 - Indicar a localização de unidades de reservação com vistas a atender novas demandas.

Simular para cada zona de pressão, prováveis áreas para a localização de novas unidades de reservação (as zonas de expansão já estão incluídas nesta análise).

- *Hipótese formulada:* zonas ótimas para localizar novas unidades de reservação
- *Critérios:* altitudes, distâncias da rede geral, capacidade de armazenamento de água.
- *Restrições:* áreas com vazios urbanos
- *Altitudes:* obtidas através da Modelagem Numérica do Terreno (MNT);
- *Distâncias da rede geral:* distância euclidiana à rede geral;
- *Capacidade de armazenamento de água:* superfície interpolada através de pontos (x,y,z), onde x e y representam a localização da unidade de reservação e o z representa a variável *volume armazenado*.
- *Considerar as seguintes funções de adequação:*
 - *Altitudes:* quanto maior, mais adequado;
 - *Distâncias:* quanto menos distante, mais adequado;
 - *Capacidade de armazenamento:* quanto menor, mais adequado;
- *Vazios Urbanos:* analisar apenas nas áreas com vazios urbanos.

Verificar a possibilidade de modelar através de simulador hidráulico EPANET o funcionamento da rede atual em uma escala simplificada, bem como, modelar e simular com a inserção de novas unidades de reservação previstas.

4.4 Modelagem Espacial

A modelagem espacial pode ser considerada como uma simulação da implementação no SIG utilizado com todas as operações que deverão ser efetuadas, bem como com a representação dos planos de informação que correspondam aos resultados esperados. (Sendra, 1997) se refere a esta representação gráfica como modelo cartográfico, pois geralmente se caracteriza por um diagrama esquemático que representa planos de informação, ou seja, são mapas em algum formato específico. Todas as possibilidades de solução do problema devem ser exploradas e representadas de

forma esquemática. Neste sentido, a modelagem espacial aplicada nesta pesquisa se caracteriza pelos procedimentos descritos a seguir.

4.4.1 Pré-processamento

Em razão da diversidade de fontes e tipologias das informações envolvidas, torna-se necessário um pré-processamento de toda a informação a ser modelado no SIG.

Dados oriundos de diferentes tipos de mídia (ex: mapas digitalizados, mapas impressos, etc.) devem ser compatibilizados e definidos seus formatos de armazenamento (raster ou vetor) para utilização em ambiente SIG. Além disso, todas as informações devem estar utilizando o mesmo sistema de referência espacial, unidades compatíveis, mesma escala e mesma resolução espacial. Quando da utilização de outros programas externamente ao SIG, como gerenciadores de banco de dados, programas de modelagem hidráulica, faz-se necessária ainda nesta fase de pré-processamento a verificação de possibilidades de integração entre estes programas e o SIG.

O SIG escolhido pertence à família ESRI (Environmental Systems Research) caracterizada pelo software ArcGIS® na sua versão 9.2. De forma sumária, o ArcGIS® foi desenvolvido para computadores *desktop* e pode ser descrito como um SIG vetorial não topológico, ou seja, manipula, exclusivamente, informação geográfica arquivada de acordo com o modelo de dados vetorial (apesar de também suportar informação em formato raster) e que não disponibiliza ferramentas de edição automática da topologia nem efetua análises espaciais com base em relações topológicas. O Spatial Analyst® é a extensão do ArcGIS que o habilita como “SIG raster” e disponibiliza as funções específicas para tratamento de planos de informações em formato raster (grades regulares). O 3D Analyst® é a extensão do ArcGIS que realiza análises espaciais tridimensionais e geração de grades irregulares (TIN — Triangular Irregular Network).

Também foram utilizados dados de satélite Landsat (Land Remote Sensing Satellite) para avaliação de zonas de expansão urbana, além de imagens SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) para aperfeiçoar a amostra de pontos cotados obtidos junto à CAGEPA. A série Landsat são imagens de satélite do espaço terrestre, possibilitando o monitoramento e mapeamento das feições da superfície terrestre em uma resolução de 30 metros, na maioria de suas bandas espectrais. O sistema de radar SRTM tem como missão obter um modelo digital de terreno da zona da Terra entre 56 °S e 60 °N, de

modo a gerar uma base completa de cartas topográficas digitais terrestre de alta resolução.

Foram utilizados informações sobre números populacionais e número de domicílios atendidos pela rede geral através dos setores censitários do IBGE (2000). A partir dos dados dos setores censitários, de forma ágil e estruturada, são permitidas consultas, construção de planilhas, criação de mapas, dentre outras possibilidades.

A modelagem conceitual definiu quais dados seriam de fato necessários para a modelagem espacial. A grande maioria dos dados foram obtidos em formato impresso e em seguida inseridos na base digital. Os dados de altimetria obtidos junto à CAGEPA e os de uso do solo obtidos junto à SEPLAN (Secretaria de Planejamento do Município) apresentam-se com a projeção cartográfica UTM (Universal Transverse Mercator), e serviram como “plano de fundo” para a digitalização dos dados obtidos em formato impresso. As informações dos setores censitários (IBGE, 2000) também apresentam o sistema de projeção referido.

Todas as informações geradas em formato raster apresentam resolução espacial de 5x5 metros. Esta resolução pode ser considerada compatível para estudos em áreas urbanas.

Devido a questões operacionais, não foi possível integrar o ArcGIS com o EPANET. A indisponibilidade de informações, tais como, consumos pontuais na rede, espacialização das demandas potenciais, entre outros, impossibilitaram uma modelagem coerente da rede no EPANET.

4.4.2 Desenvolvimento do modelo

Para o desenvolvimento do modelo são criados diagramas esquemáticos que representam de forma clara os planos de informação e as operações a serem realizadas em cada alternativa. A modelagem é considerada uma simulação da implementação no SIG, com todas as operações que deverão ser efetuadas, bem como a representação dos planos de informação que correspondam aos resultados esperados. As Figuras 16 e 17 representam a modelagem espacial da Alternativa 1, enquanto que a Figura 18 representa a modelagem da Alternativa 2.

Alternativa 1: Realizar um diagnóstico da localização atual dos reservatórios do ponto de vista do atendimento à demanda

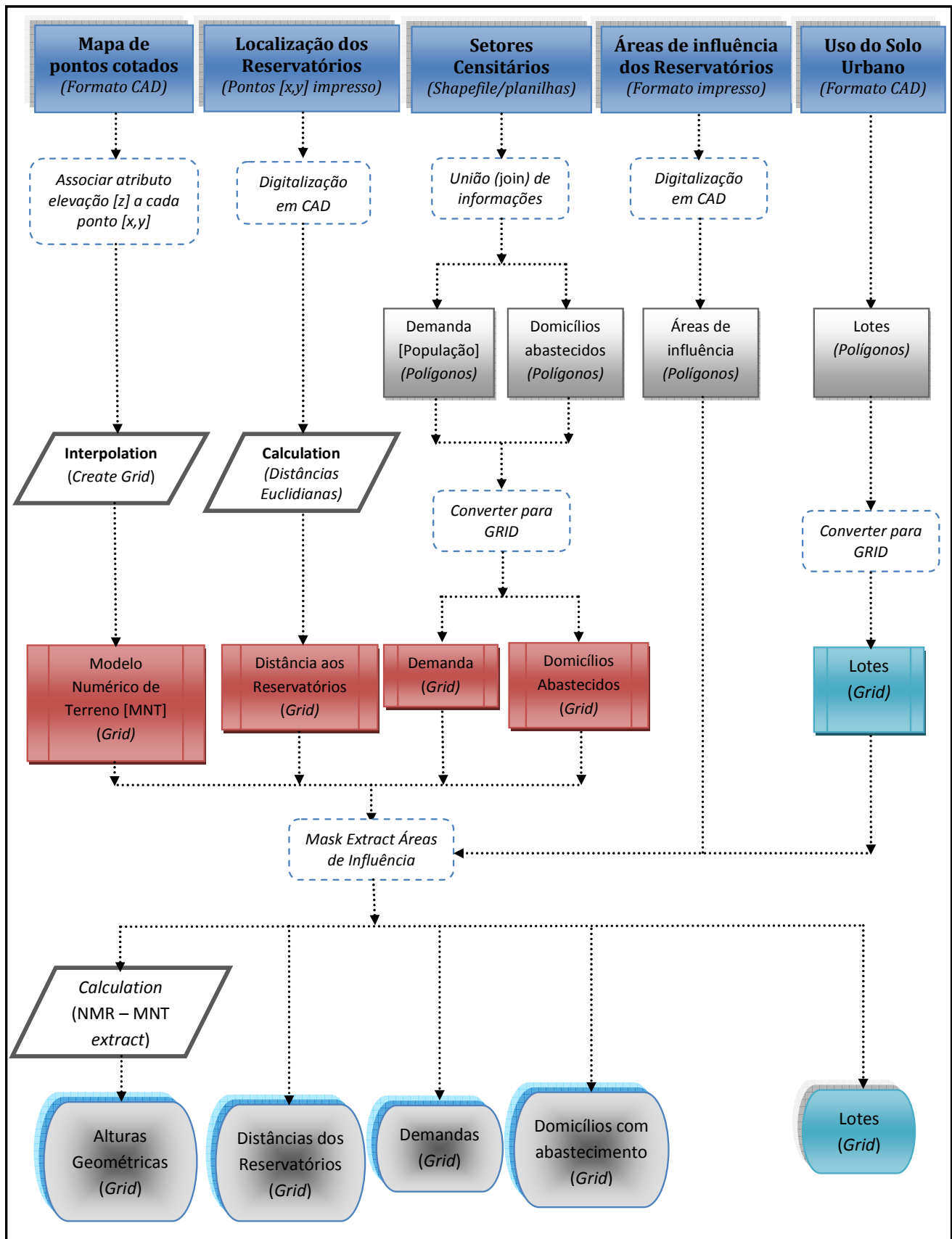


Figura 16: Modelagem espacial da Alternativa 1

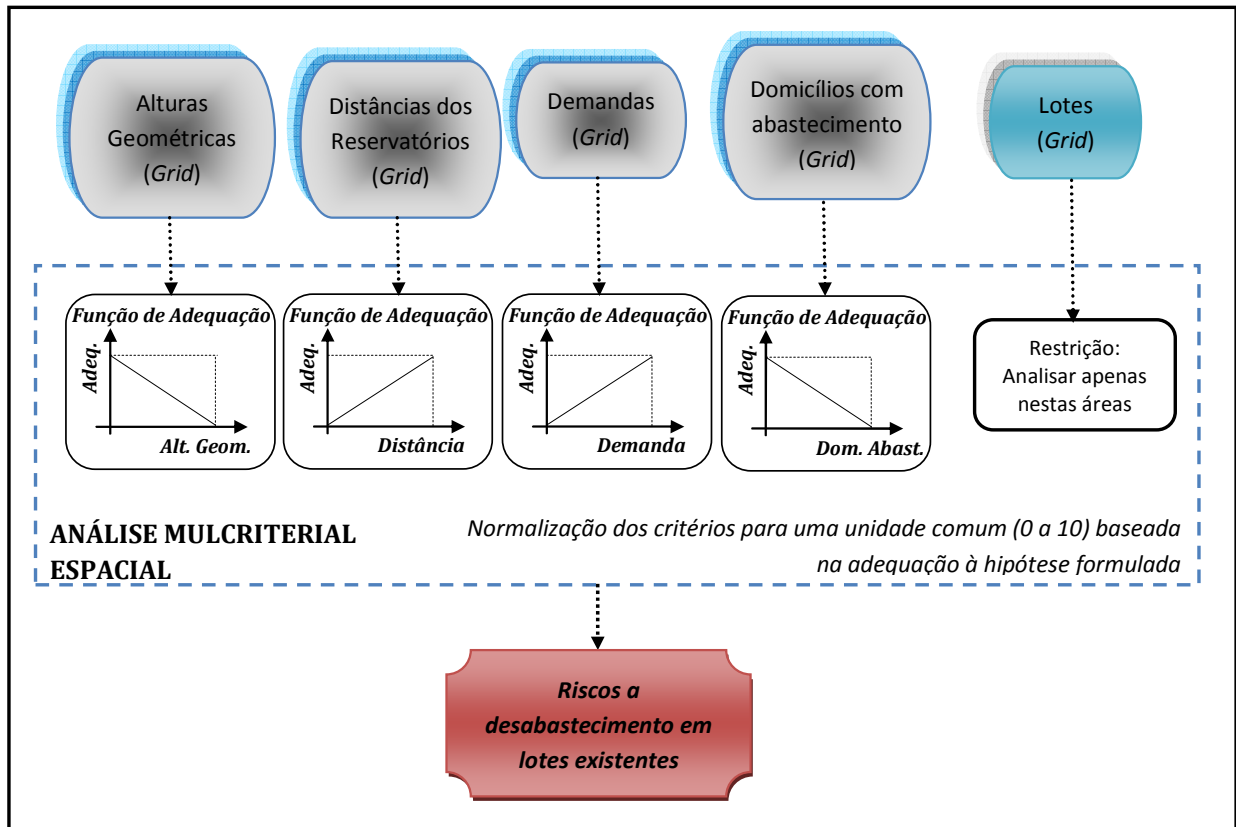


Figura 17: Modelagem espacial da Alternativa 1 (continuação)

Alternativa 2 - Indicar a localização de unidades de reservação com vistas a atender novas demandas

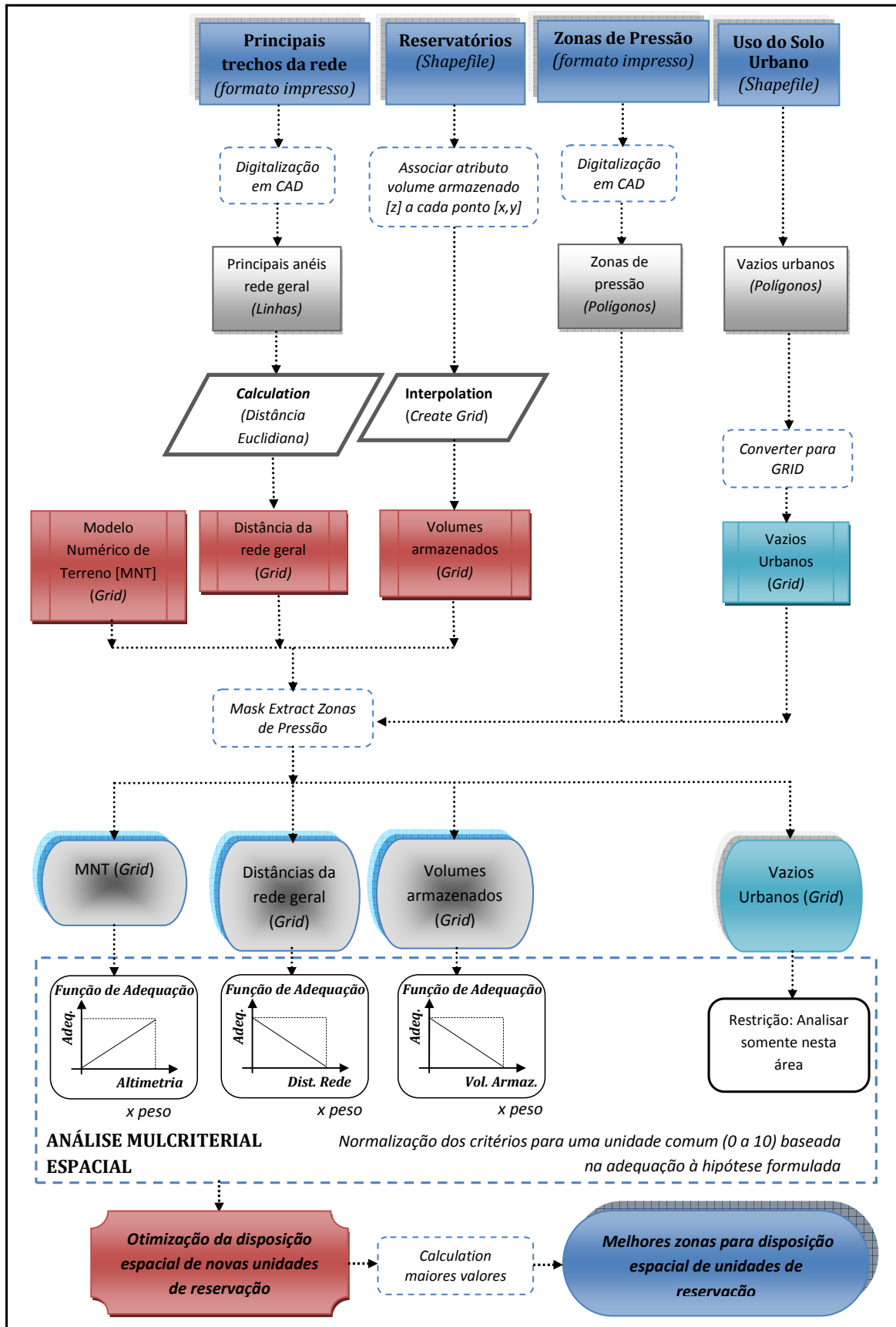


Figura 18: Modelagem espacial da Alternativa 2

4.4.3 Implementação

Na fase da implementação são executados todos os comandos formalizados na modelagem espacial com o propósito de obter os resultados esperados.

Neste sentido, são apresentados a seguir os Planos de Informações (PI) abrigados na análise do problema. Ressalta-se que, embora os PI tenham sido gerados para toda a área de estudo (exceto os PI de distâncias às unidades de reservação, gerados para cada área de influência a partir da localização destas unidades) as análises foram realizadas em faixas limitadas por características do SUDA avaliado, a saber: na Alternativa 1, foram utilizadas os limites das áreas de influência de cada unidade de reservação, já na Alternativa 2, foram utilizadas os limites do zoneamento de pressões do sistema.

Para obter os PI para os limites de áreas referidos, utilizou-se a função de extração de máscara (*extract mask*), presente na maioria dos SIG, inclusive no ArcGIS, como exemplificado na Figura 19.



Figura 19: Exemplo de extração de informação de um PI a partir de uma área de interesse (ESRI, 2006)

- *Localização das unidades de reservação*

Após serem lançados na base de dados digital, os pontos de coordenadas (x,y) que representam as unidades de reservação, gerou-se um mapa com a disposição espacial destes (Figura 20). A partir da localização foram gerados mapas de distâncias para as

áreas de influência de cada unidade, informação utilizada na Alternativa 1. Além disso, aos pontos que representa cada unidade, foram associados os atributos que constam na Tabela 1, com os quais foram gerados outros planos de informação. Através da sobreposição desta camada com o MNT, foi possível também extrair as cotas do terreno para cada unidade.

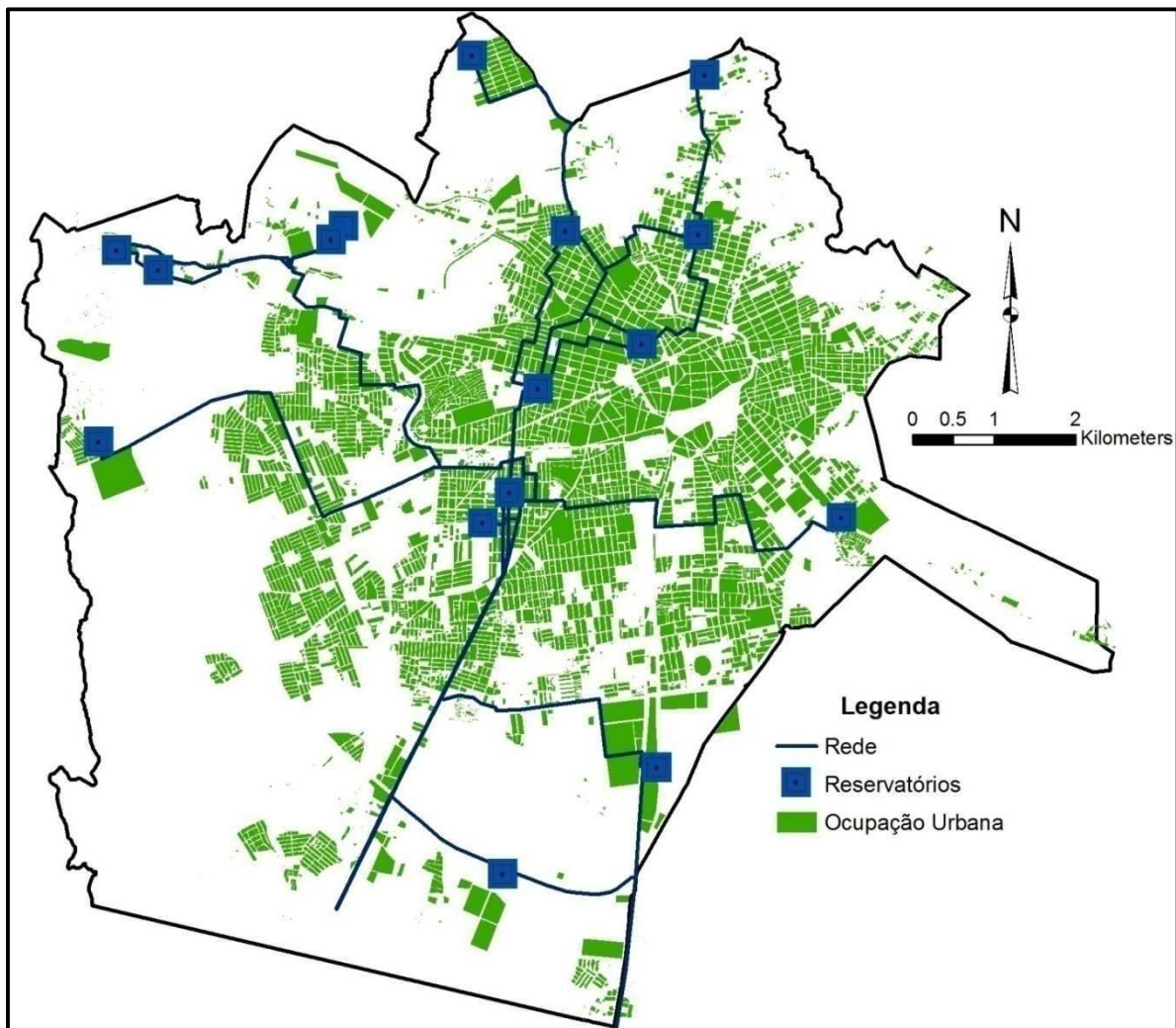


Figura 20: Localização das unidades de reservação operadas do SUDA de Campina Grande, PB e rede geral com principais condutos

- *Áreas de influência*

As análises realizadas através da Alternativa 1 limitaram-se às Áreas de Influência (AI), ou seja, o alcance espacial de atendimento as demandas de cada unidade de reservação (Figura 21). Essas áreas foram obtidas em formato impresso e em seguida

lançadas na base digital. No entanto, essa informação pode não representar exatamente o alcance espacial de atendimento de cada unidade, pois devido à dinâmica de crescimento urbano, são adicionadas rapidamente novas derivações da rede para atender novas demandas, ocasionando a intervenção de um alcance em outro. Vale lembrar que não foram consideradas na análise da Alternativa 1, por ausência de informações em alguns dos PI considerados, as áreas de influência das seguintes unidades de reservação: R2, R15, R28.

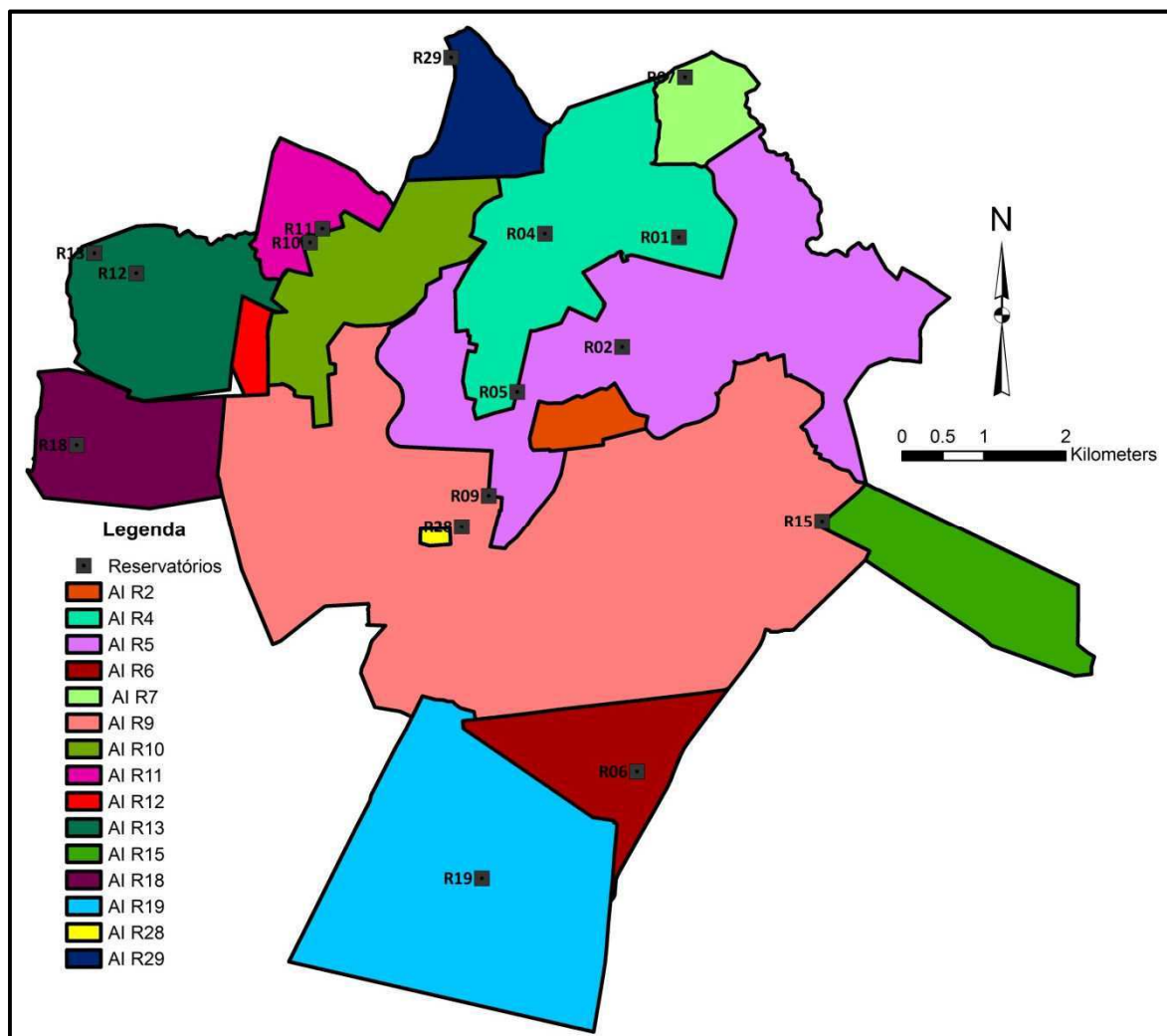


Figura 21: Áreas de influência das unidades de reservação do SUDA de Campina Grande, PB

- *Altimetria*

Quando se trata de sistemas de abastecimento de água em uma cidade como Campina Grande, com um relevo fortemente ondulado, o conhecimento da altimetria da

área é de fundamental importância. A otimização da disposição espacial de um reservatório de água depende diretamente da altimetria, pois locais distintos com altitudes diferenciadas podem gerar pressões na rede completamente diferentes com custos também diferenciados de implantação, operação e manutenção.

Para a obtenção do Modelo Numérico do Terreno (MNT) foi gerada uma grade irregular triangular (TIN do inglês: Triangular Irregular Network) (Figura 9). Na modelagem da superfície por meio de grade irregular triangular, cada polígono que forma uma face do poliedro é um triângulo. Os vértices do triângulo são geralmente os pontos amostrados da superfície. Este tipo de modelagem permite que informações morfológicas importantes, como as discontinuidades representadas por feições lineares de relevo (cristas) e drenagem (vales), sejam consideradas, possibilitando, assim, modelar a superfície do terreno preservando as feições geomórficas. Em seguida, esta grade irregular foi transformada em uma grade regular (GRID) (Figura 22) para que fosse possível sua utilização através de álgebra de mapas (operações realizadas célula a célula). Para a obtenção desta grade regular, após alguns testes, optou-se por uma resolução de 5 x 5 metros de tamanho e, portanto, todas as informações a elas associadas também devem apresentar a mesma resolução espacial.

Neste sentido, o MNT foi utilizado nas duas Alternativas avaliadas. Enquanto que, na Alternativa 1 foi utilizado no cálculo das alturas geométricas (subtração entre o nível médio de cada unidade de reservação e o MNT extraído para cada área de influência), na Alternativa 2 foi utilizado o próprio MNT, extraído para as área do zoneamento.

- *Alturas Geométricas*

Em sistemas urbanos de distribuição de água devem existir limites de pressões de serviço, para garantir que a água chegue aos pontos de consumo com uma carga suficiente para vencer as perdas nas tubulações e alcançar os usuários com a vazão adequada.

Na impossibilidade de mapear as pressões no sistema caso de estudo, devido à limitações de dados, optou-se na utilização como critério as Alturas Geométricas, obtidas através da operação de subtração entre os níveis médios de água das unidades de reservação e a altimetria (MNT), anteriormente apresentada.

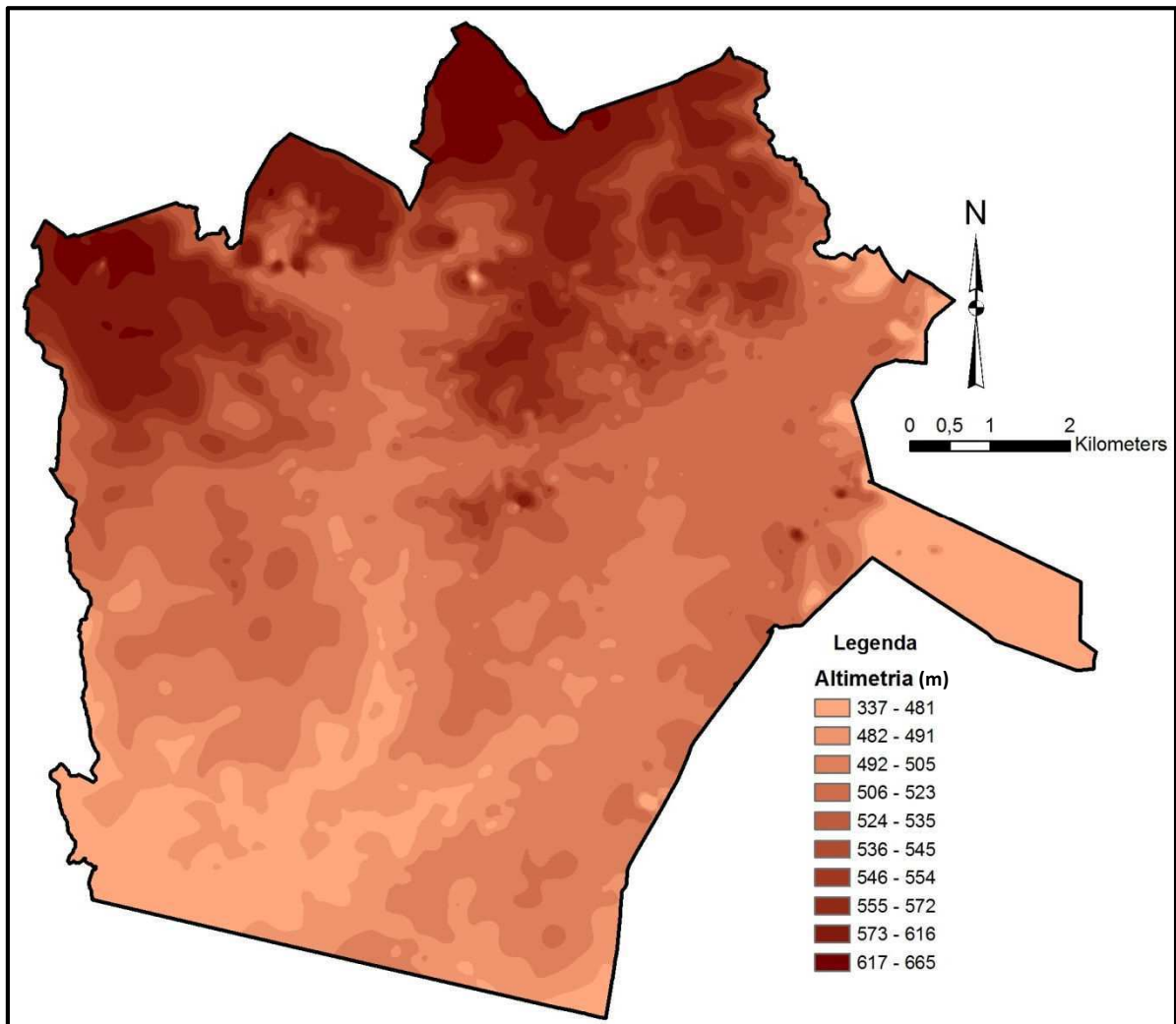


Figura 22: Modelagem numérica do terreno em grade regular (elaborado a partir de dados da CAGEPA)

Hidraulicamente, alturas geométricas representam as pressões estáticas no sistema. Na equação de Bernoulli, utilizada e conhecida amplamente em estudos hidráulicos, a altura geométrica representada pelo segundo termo da Equação 1. Neste caso, considerou-se a cota do nível de água das unidades de reservação em relação ao plano de referência *zona de consumo* (Figura 23). A energia total específica, ou altura manométrica total é a soma entre a altura geométrica, altura piezométrica e altura dinâmica.

$$\frac{P_1}{\gamma} + H_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + H_2 + \frac{V_2^2}{2g} - h_{1-2} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$\frac{P}{\gamma}$: alturas piezométricas;

H : alturas geométricas;

$\frac{v^2}{2g}$: altura dinâmica;

h_{1-2} : perdas de carga.

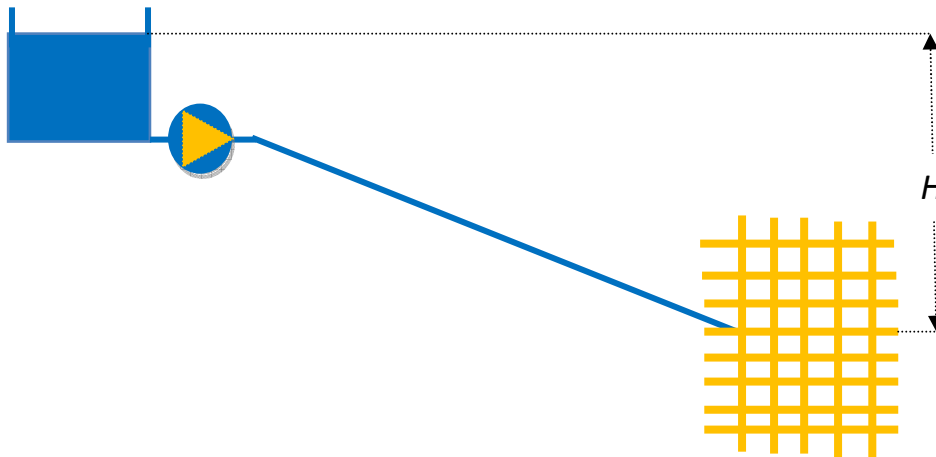


Figura 23: Representação esquemática da altura geométrica em relação a um plano de referência específico

A seguir serão apresentados os planos de informações do MNT e alturas geométricas para as áreas de influência de cada unidade de reservação (Figura 24 a Figura 35). Altura geométrica é um tipo de energia (carga) e, portanto, os valores negativos observados nos planos de informação a seguir, significam que o nível médio dos reservatórios situa-se abaixo da cota do terreno. Ressalta-se ainda, que este e os demais critérios serão analisados somente em áreas ocupadas (lotes), por conseguinte, somente serão considerados valores de alturas geométricas nos lotes. Adverte-se que devido às diferentes dimensões das áreas de influências, os mapas referentes às Figuras 24 à 35 estão representados em escalas diferentes, para possibilitar uma melhor visualização destes.

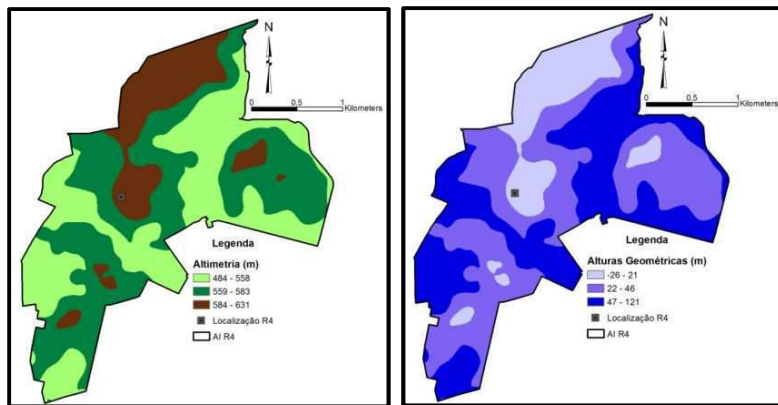


Figura 24: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R4

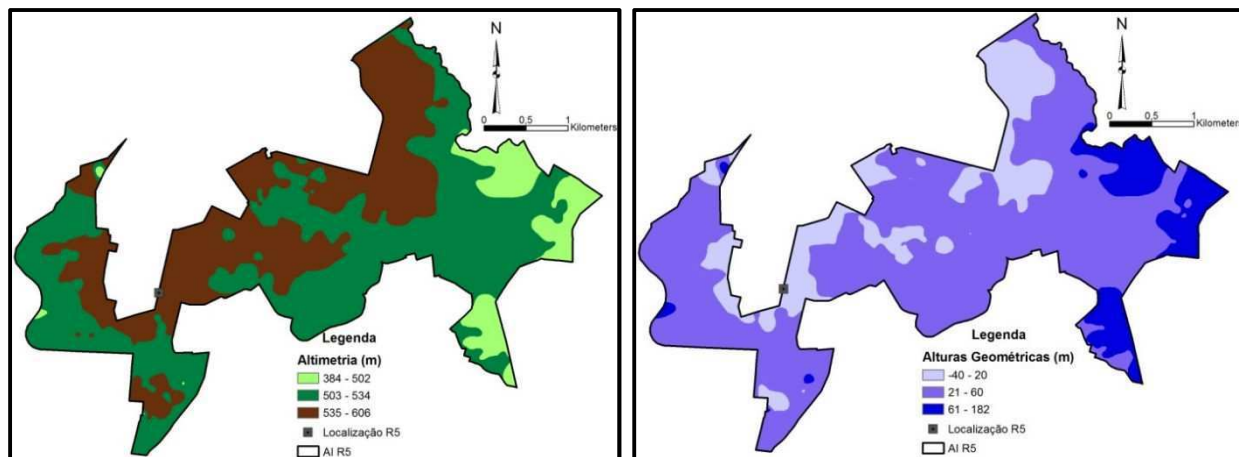


Figura 25: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R5

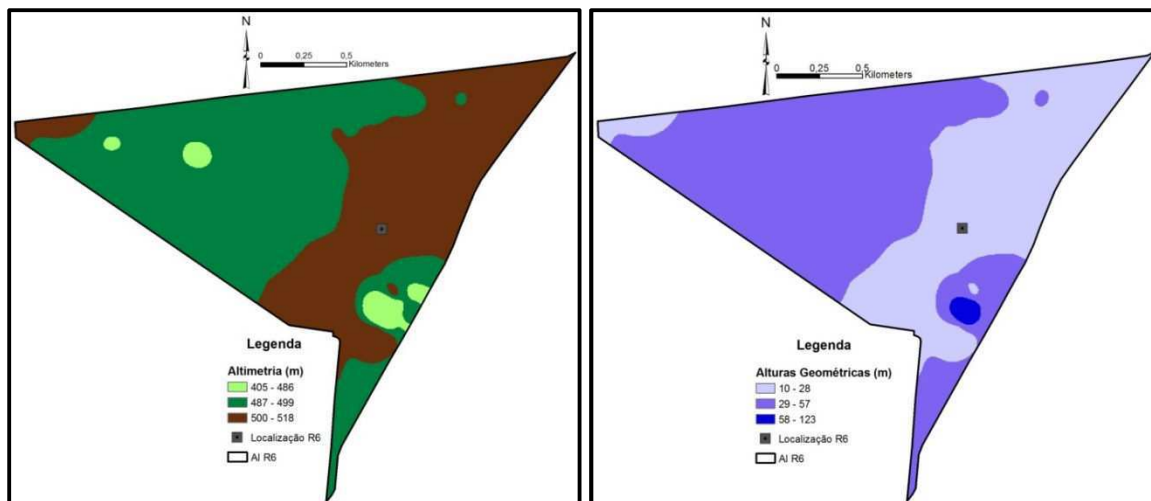


Figura 26: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R6

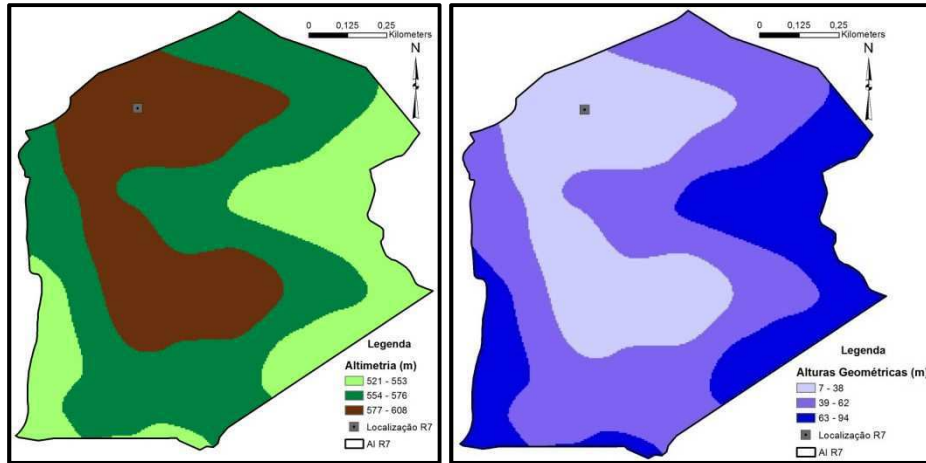


Figura 27: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R7

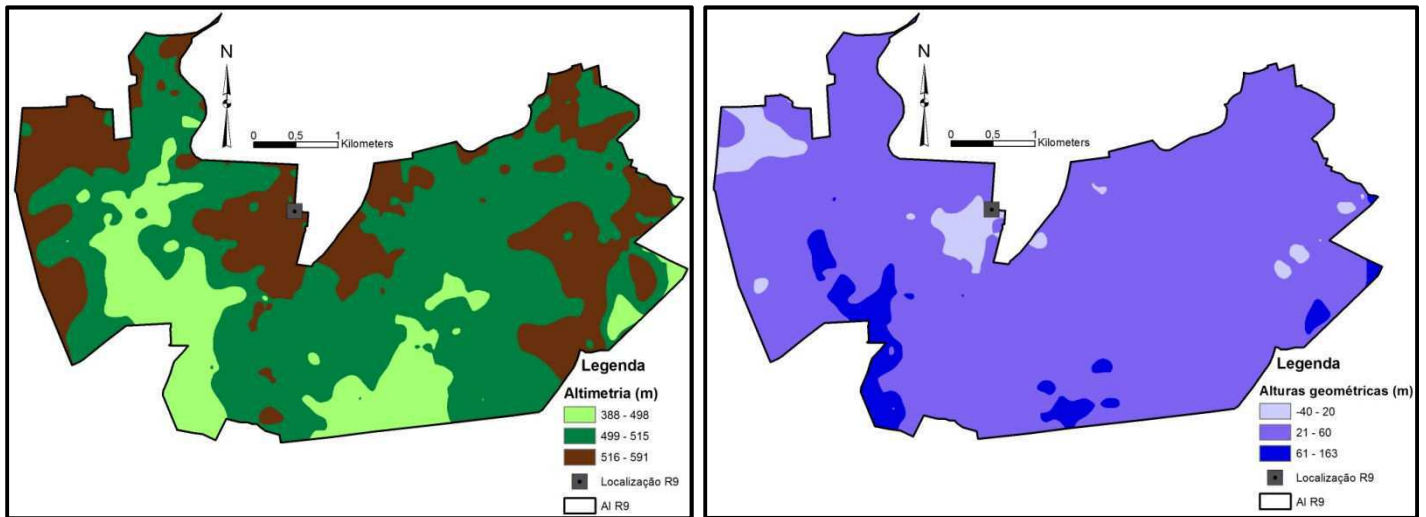


Figura 28: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R9

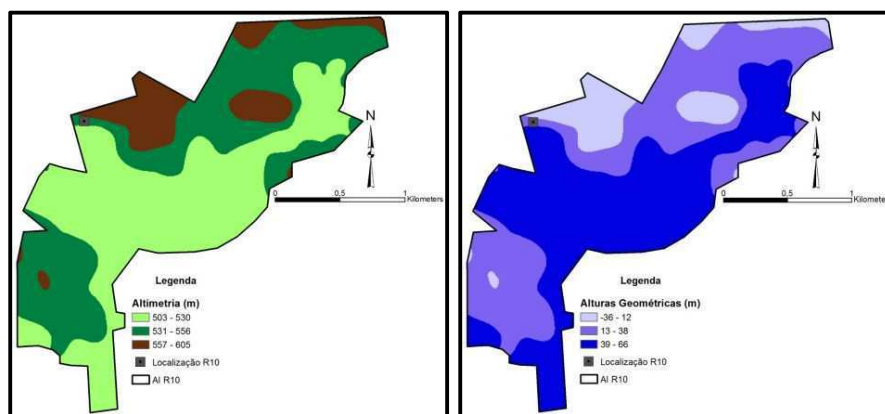


Figura 29: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R10

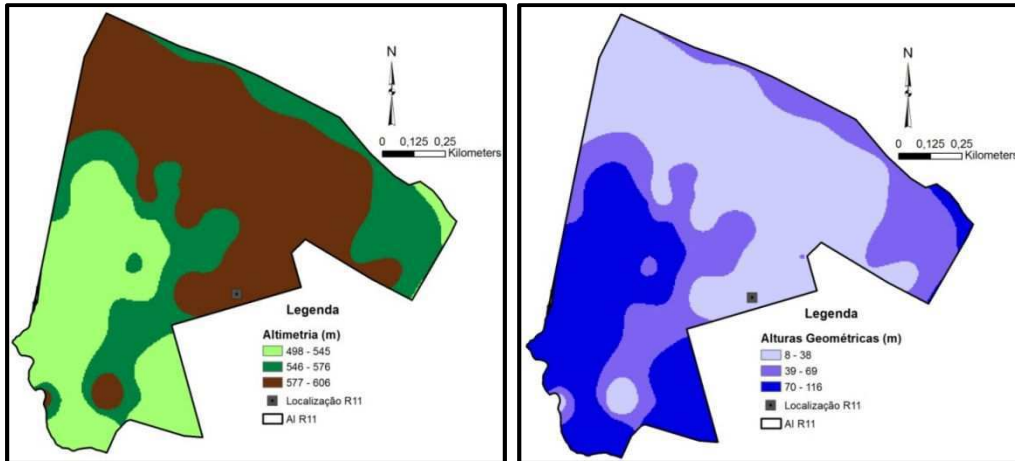


Figura 30: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R11

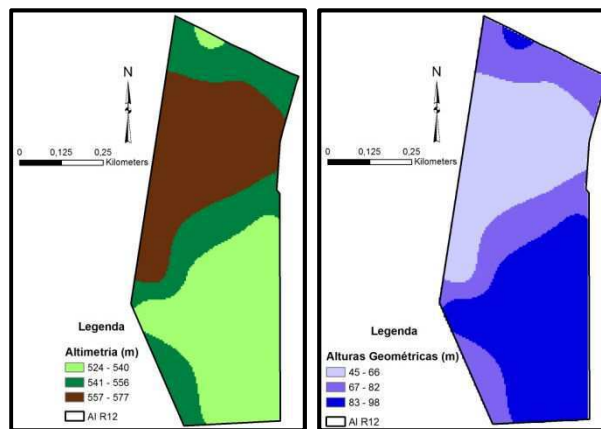


Figura 31: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R12

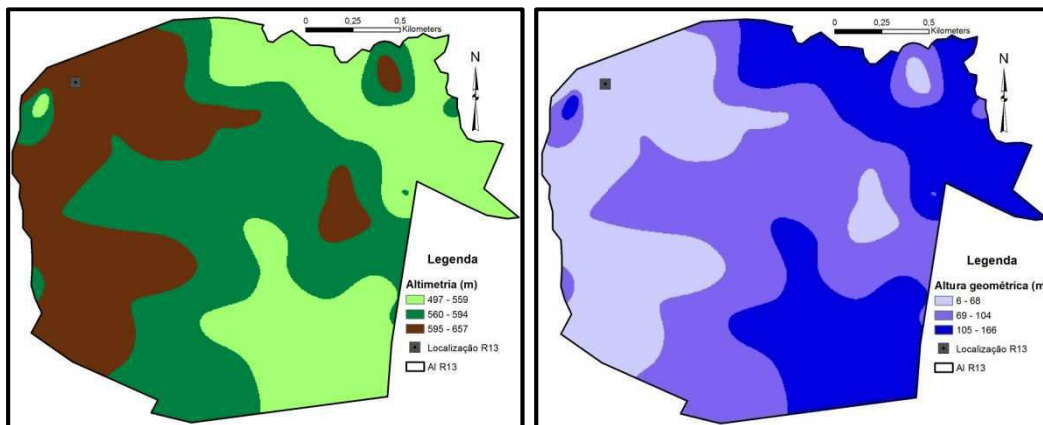


Figura 32: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R13

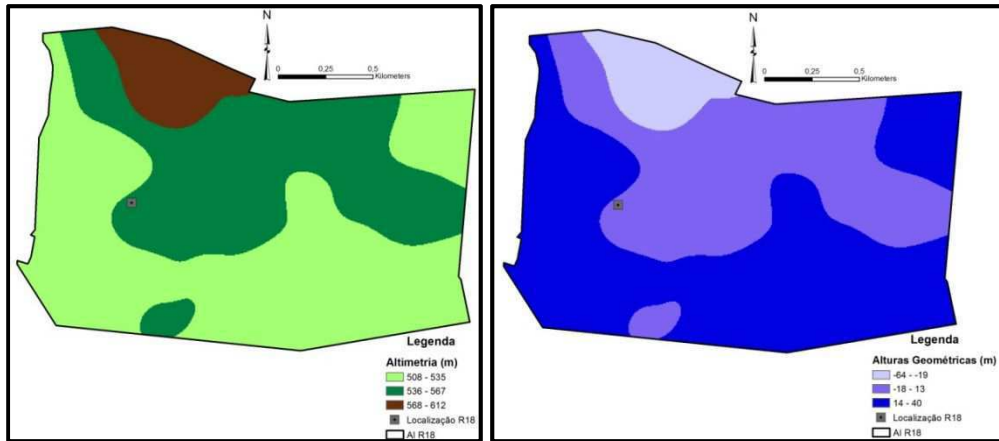


Figura 33: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R18

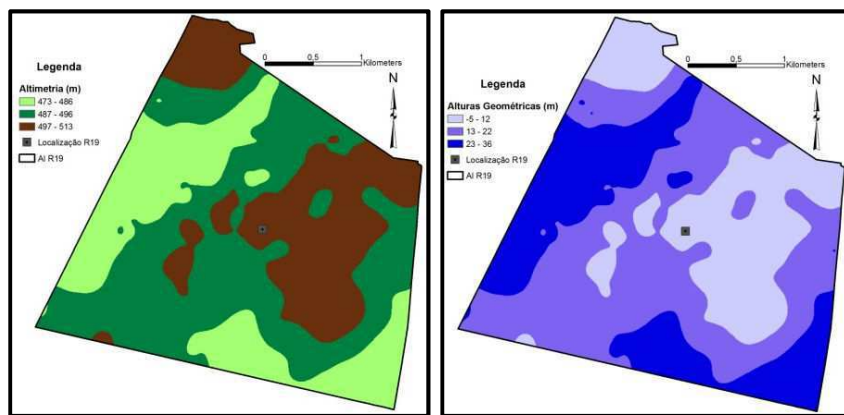


Figura 34: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R19

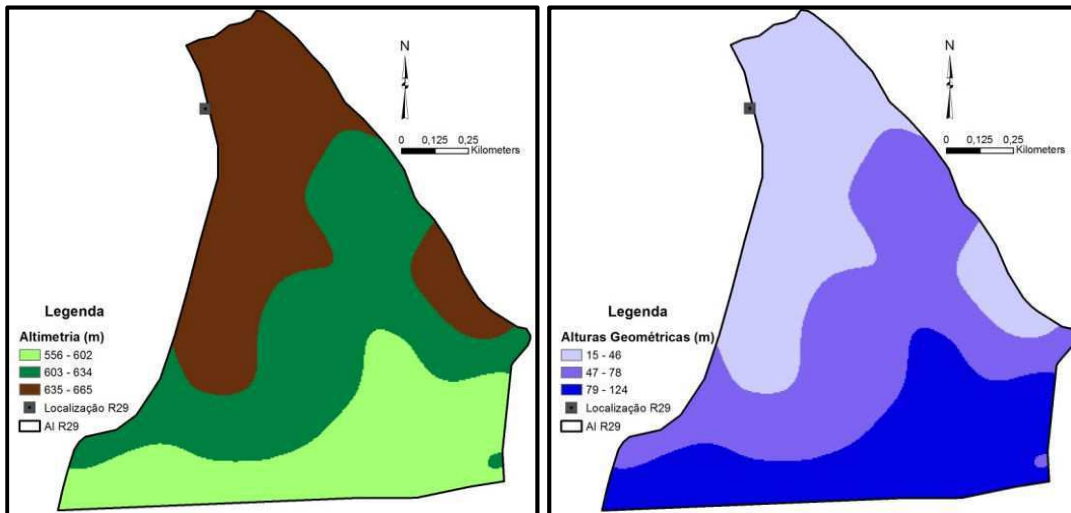


Figura 35: Altimetria e Alturas geométricas para a área de influência da unidade R29

- *Distâncias às unidades de reservação*

As distâncias foram geradas para as áreas de influência de cada unidade de reservação e estão apresentadas entre as Figuras 36 a 47.

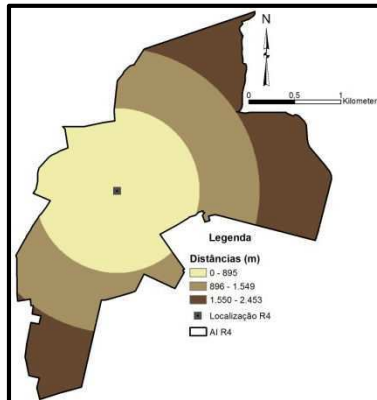


Figura 36: Distâncias obtidas em relação à unidade R4

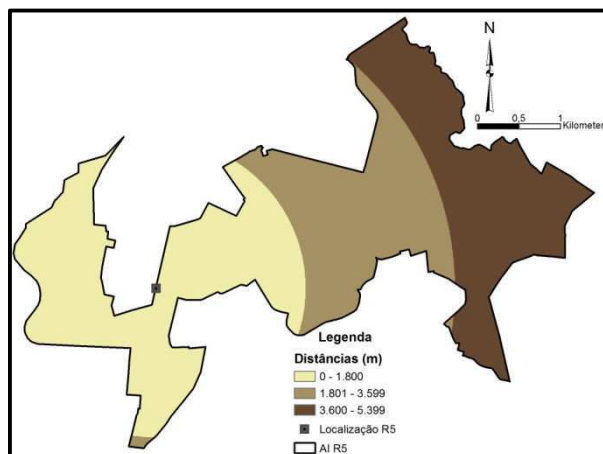


Figura 37: Distâncias obtidas em relação à unidade R5

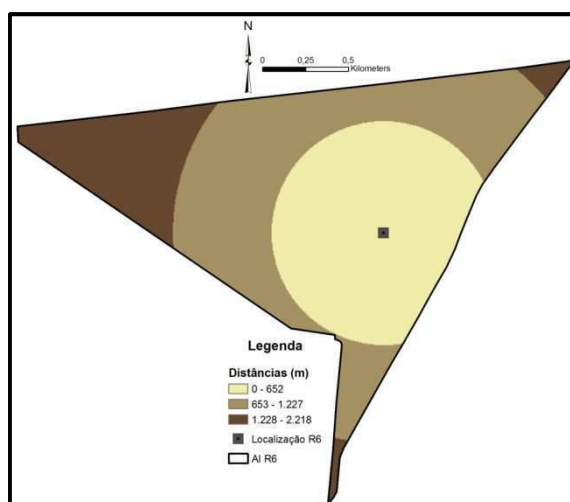


Figura 38: Distâncias obtidas em relação à unidade R6

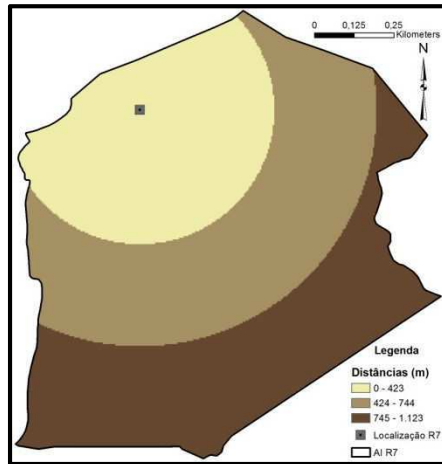


Figura 39: Distâncias obtidas em relação à unidade R7

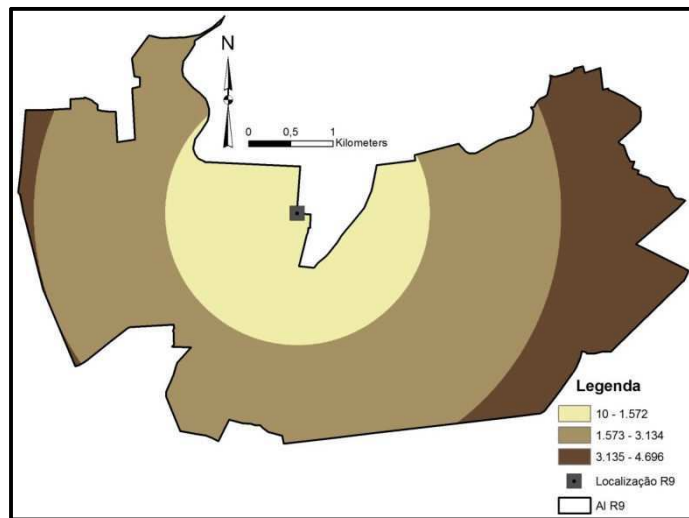


Figura 40: Distâncias obtidas em relação à unidade R9

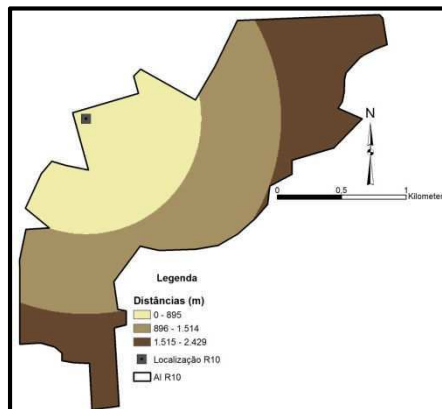


Figura 41: Distâncias obtidas em relação à unidade R10

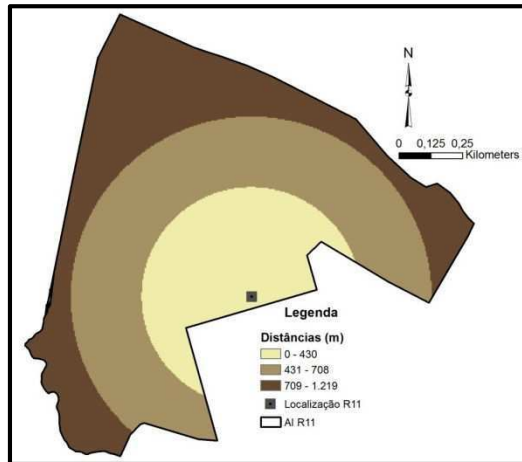


Figura 42: Distâncias obtidas em relação à unidade R11

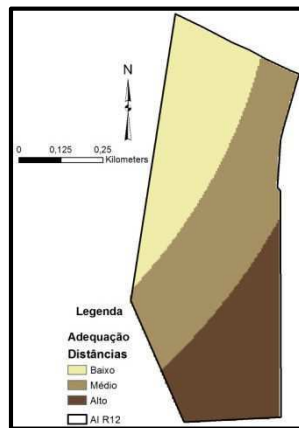


Figura 43: Distâncias obtidas em relação à unidade R12

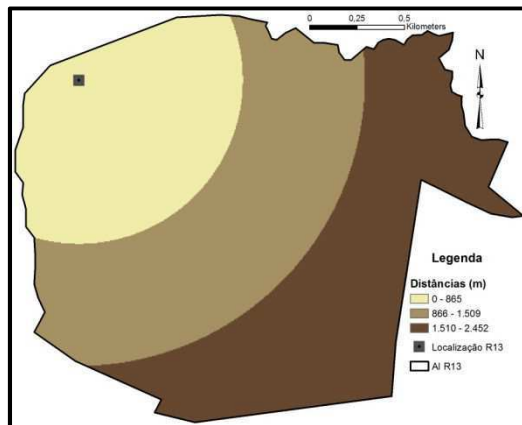


Figura 44: Distâncias obtidas em relação à unidade R13

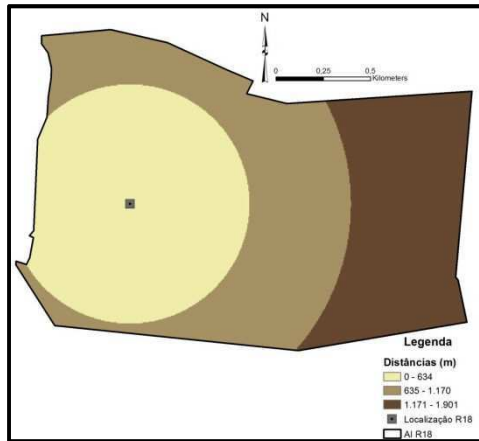


Figura 45: Distâncias obtidas em relação à unidade R18

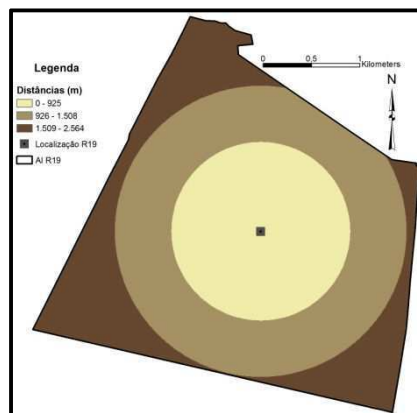


Figura 46: Distâncias obtidas em relação à unidade R19

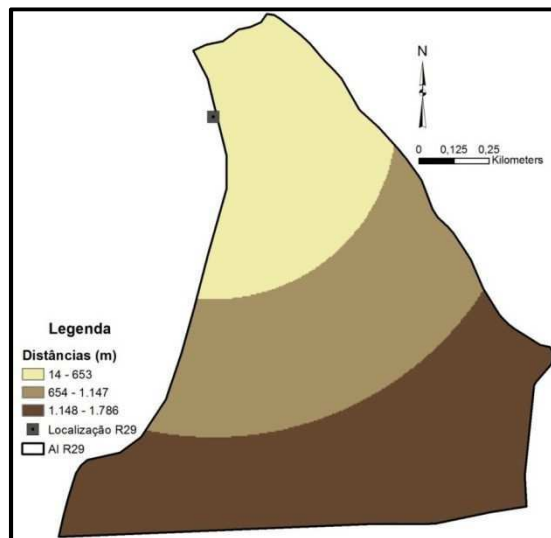


Figura 47: Distâncias obtidas em relação à unidade R29

- *População*

Os registros populacionais estão entre os aspectos fundamentais para elaboração de planos de abastecimentos de água. Existe uma inter-relação entre população e muitas outras variáveis que constituem os SUDA, tais como: demandas de água, fatores que afetam o consumo diário, vazão, pressões, determinação da capacidade do reservatório, entre outras. Os projetos possuem alcances temporais, que em geral, variam de 10 a 30 anos. Neste contexto, é de fundamental importância estimativas da população prevista para os próximos anos naquela localidade e qual o tipo de finalidade do uso da água para a população. Fatores, tais como: tendência de crescimento da população e as necessidades humanas, devem ser analisados. Importante observar que quanto mais acelerado for o crescimento da população, menor deverá ser o alcance do plano, vida útil dos equipamentos e das obras civis. Quanto maior a vida útil das estruturas físicas, maior será: o alcance de projeto, a disponibilidade financeira e o número de pessoas atendidas. Neste sentido, utilizando informações de setores censitários do IBGE, tornou-se possível espacializar a população de Campina Grande para o ano de 2000 (Figura 48), espacialização esta, utilizada na Alternativa 1. Adverte-se que os setores censitários, na maioria dos casos não coincidem com a divisão administrativa por bairros, mas a espacialização nesta unidade de trabalho permite uma análise que abrange grande parte da área urbana do município.

- *Domicílios atendidos pela rede geral*

Quantificar os domicílios que são atendidos através da rede geral de distribuição de água pode indicar sinais de áreas não atendidas por este serviço. As informações dos setores censitários do IBGE (2000) trazem aspectos relacionados às formas de abastecimento de água, assim como apresentam situações de domicílios que são atendidos (Figura 49) ou aqueles que não são pela rede geral.

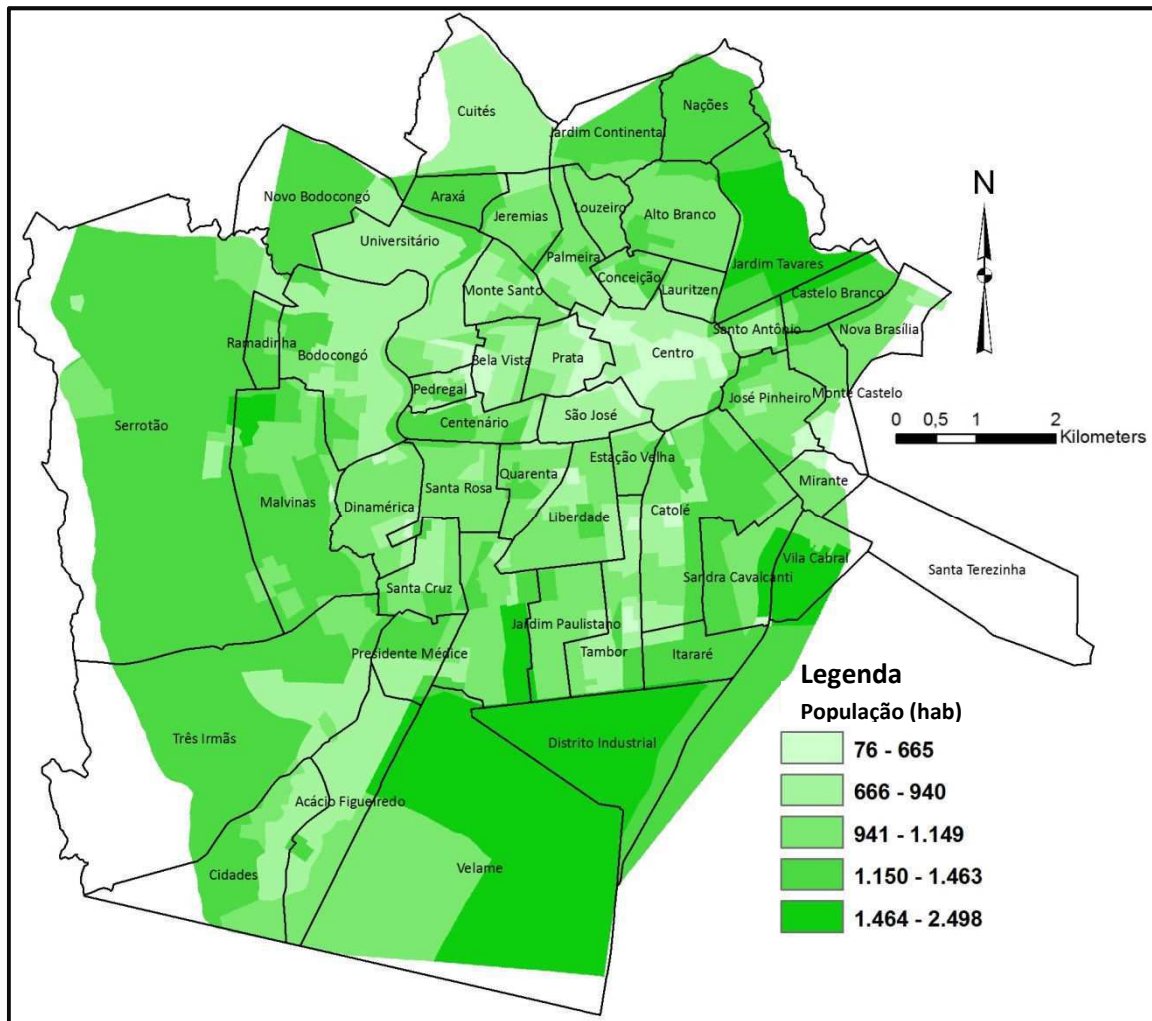


Figura 48: População em Campina Grande, PB segundo censo do IBGE (2000)

É importante destacar que os dados sobre abastecimento de água coletados durante o censo demográfico, devem ser tomados como informações referidas pela população. Nestes questionários, a população é perguntada, entre outros itens, sobre a forma como seu domicílio é abastecido de água, se por rede pública, ou por poços e nascentes. A resposta a este item depende do entendimento dos moradores sobre a maneira preponderante como aquele domicílio é abastecido. Assim como os números populacionais apresentados anteriormente, esses dados são referentes ao ano de 2000, o que não representa a realidade atual. No entanto, em caso de escassez de dados atualizados, justifica-se o uso de dados oficiais, mesmo que estes estejam desatualizados. Cada uma destas informações, construídas na forma de camadas, possui, portanto, limitações de análise inerentes à sua própria construção, sendo o SIG uma ferramenta importante na integração, inter-relacionamento e validação destas informações (Briggs, 1992). Por intermédio de operações espaciais, podem-se obter informações sobre

variáveis contidas em duas ou mais destas camadas, como, por exemplo, a localização de áreas de pobreza onde os riscos a desabastecimento são em geral agravados pela carência sócio-econômica.

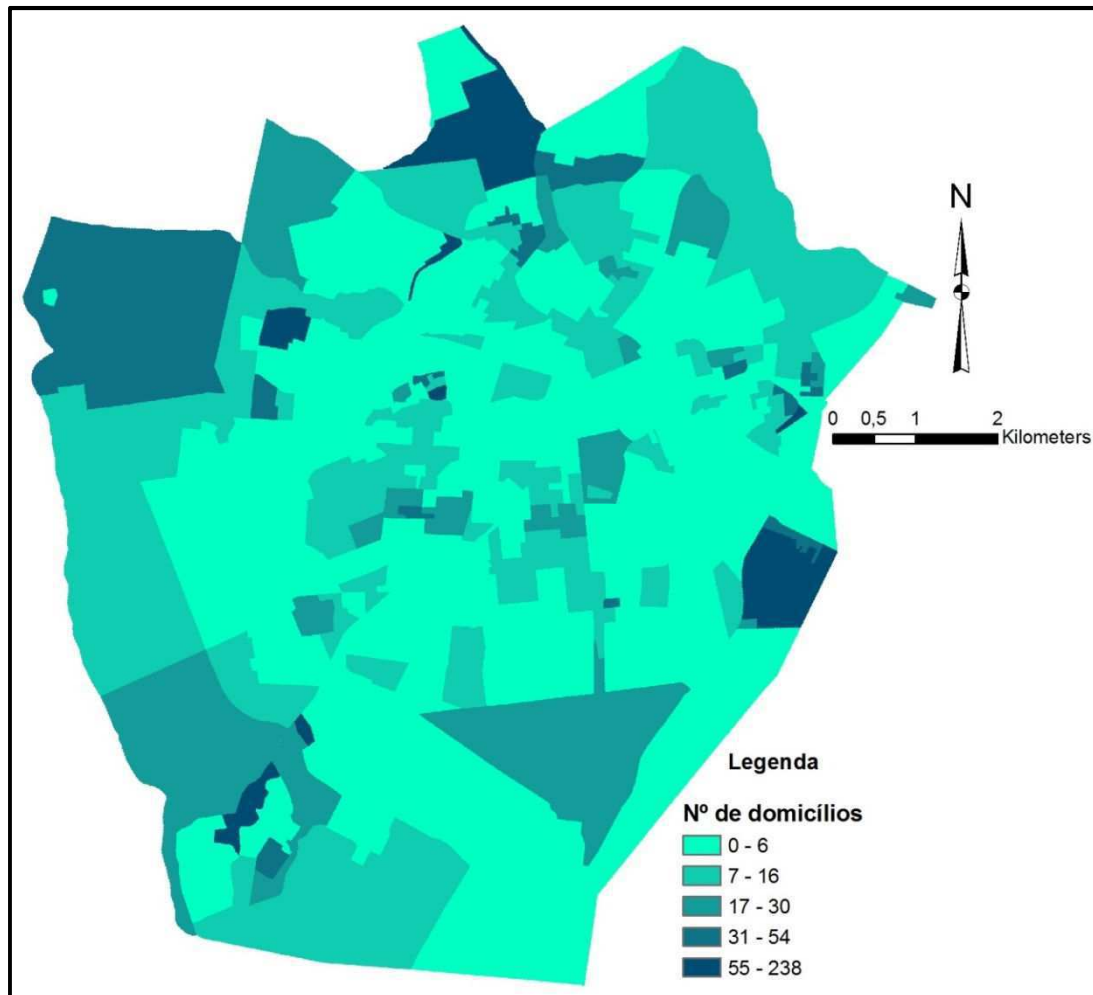


Figura 49: Número de domicílios atendidos através da rede geral do SUDA em Campina Grande, PB segundo censo do IBGE (2000)

- *Uso do solo urbano*

O mapa de uso do solo (Figura 50) é um dado fonte para a obtenção da localização da demanda potencial (usuários) de cada reservatório. Neste sentido, na Alternativa 1 esse plano de informação foi entendido como uma restrição. Ou seja, os critérios foram analisados somente nas áreas ocupadas (lotes).

Em oposição, na Alternativa 2, foi utilizado uma operação de subtração para obter áreas não ocupadas, ou seja, os vazios urbanos. Isto por que, a implantação de novas unidades de reservação está condicionada a locais vazios e muitas vezes, ao critério de desapropriação do terreno. Nesta análise não foi considerada esta restrição. Uma situação ideal para este tipo de estudo, seria obter essa informação classificada, ou seja, cada objeto (polígono) representando um tipo de uso (residencial, comercial, público, industrial), entretanto, a informação não se achava disponível. Ressalta-se, entretanto, que o solo urbano é muito dinâmico e por este motivo alguns dados obtidos devem ser atualizados em campo ou assumidos como uma realidade referente à determinada época. A informação aqui utilizada refere-se ao ano de 2006.

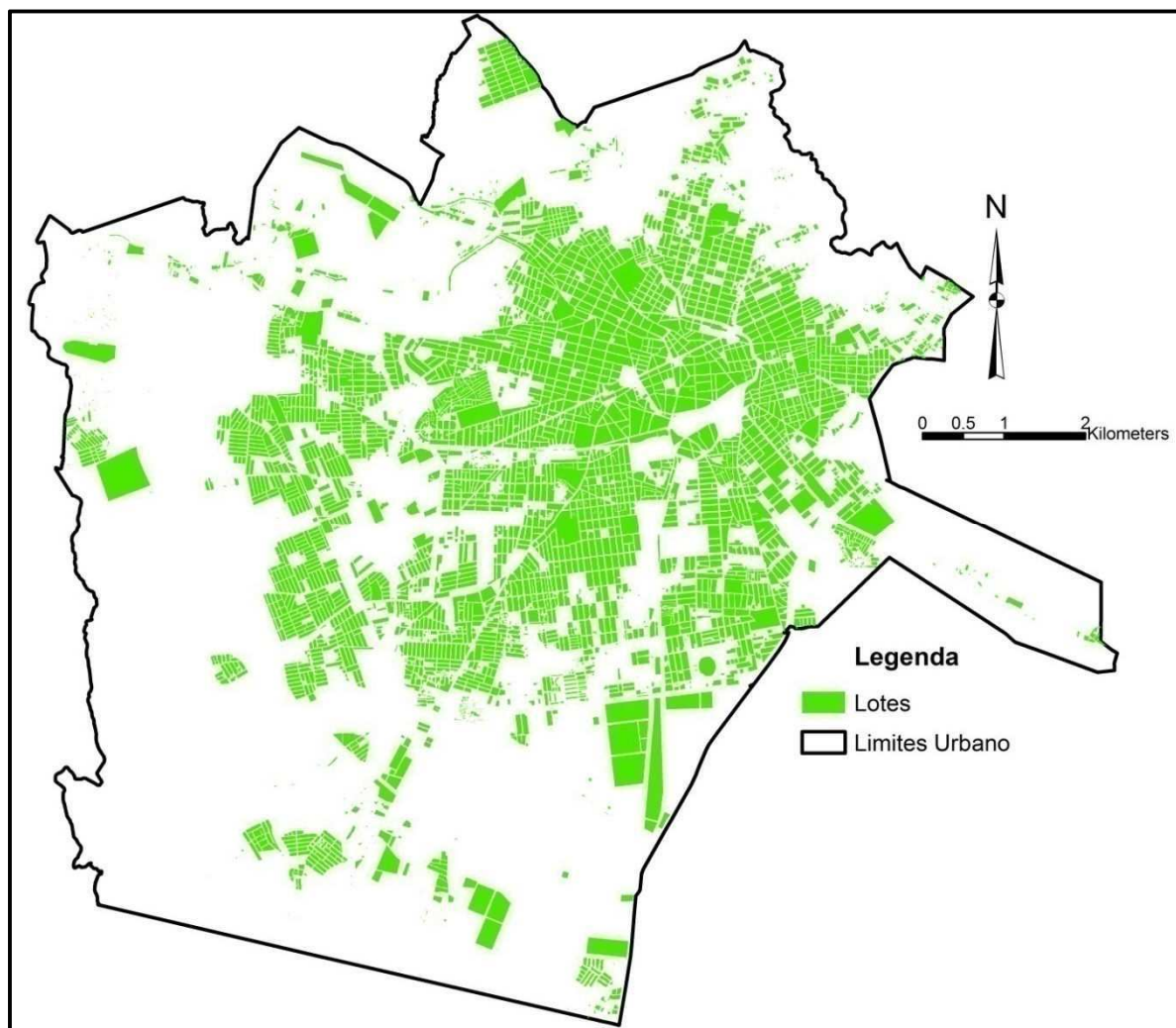


Figura 50: Uso do solo da cidade de Campina Grande, PB para o ano de 2006

- *Zonas de pressão*

As zonas de pressão, utilizadas com limite espacial das análises da Alternativa 2, fazem parte do zoneamento do sistema utilizado pela própria CAGEPA. Em geral, esse zoneamento da rede em zonas de pressão é uma técnica utilizada em sistemas de médio e grande porte para promover a operação e manutenção de uma forma mais eficiente. De maneira geral, em cidades ou bairros com topografia acidentada, as redes devem ser divididas por zonas de pressão para atender os limites de cargas necessários. Essa informação foi adquirida em formato impresso e em seguida lançada na base digital. São quatro as zonas de pressão do SUDA de Campina Grande (Figura 51): Zona A e Zona D estão as menores e maiores pressões, respectivamente. As Zonas B e C apresentam números intermediários de pressão. Desta forma, a Zona A está na região mais baixa da cidade em termos de altimetria, enquanto que a zona D situa-se na região mais alta. Da mesma forma, as zonas B e C, estão em regiões de altimetria intermediária que cresce gradativamente da zona B à zona C. Vale lembrar que as áreas de expansão urbana já estão inseridas dentro dos limites da Zona A.

- *Distâncias à rede geral*

O desenho da rede geral representado aqui por meio dos condutos principais (Figura 52), foi digitalizado, tornando possível gerar mapa de distâncias à rede. Este plano de informação foi utilizado na Alternativa 2 para cada zona de pressão. As distâncias à rede tornam-se um critério no processo de tomada de decisão em planejamento de SUDA, visto que, a proximidade da rede incidirá em aspectos econômicos e operacionais. Por exemplo, uma unidade de reservação localizada muito distante da rede geral existente pode acarretar maiores custos, menores pressões, etc.

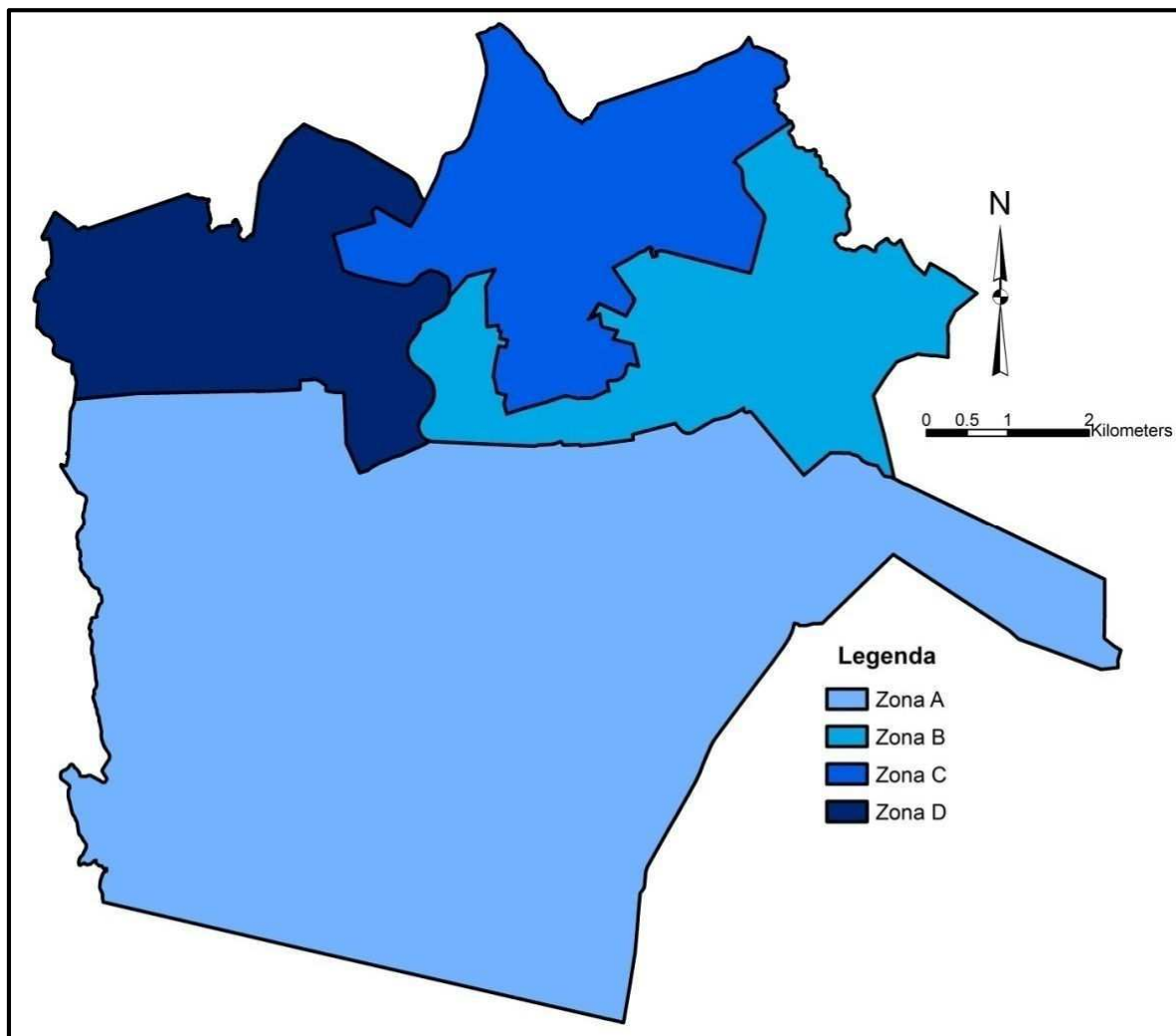


Figura 51: Zoneamento utilizado no SUDA de Campina Grande, PB

Por outro lado, destaca-se que o abastecimento efetivo dos usuários depende, no entanto, de outras características de projeto e de operação, tais como: pressões, vazões e regime de fluxo da rede, bem como da disposição da população em pagar por este serviço. A espacialização dessa camada pode ser visualizada na Figura 52.

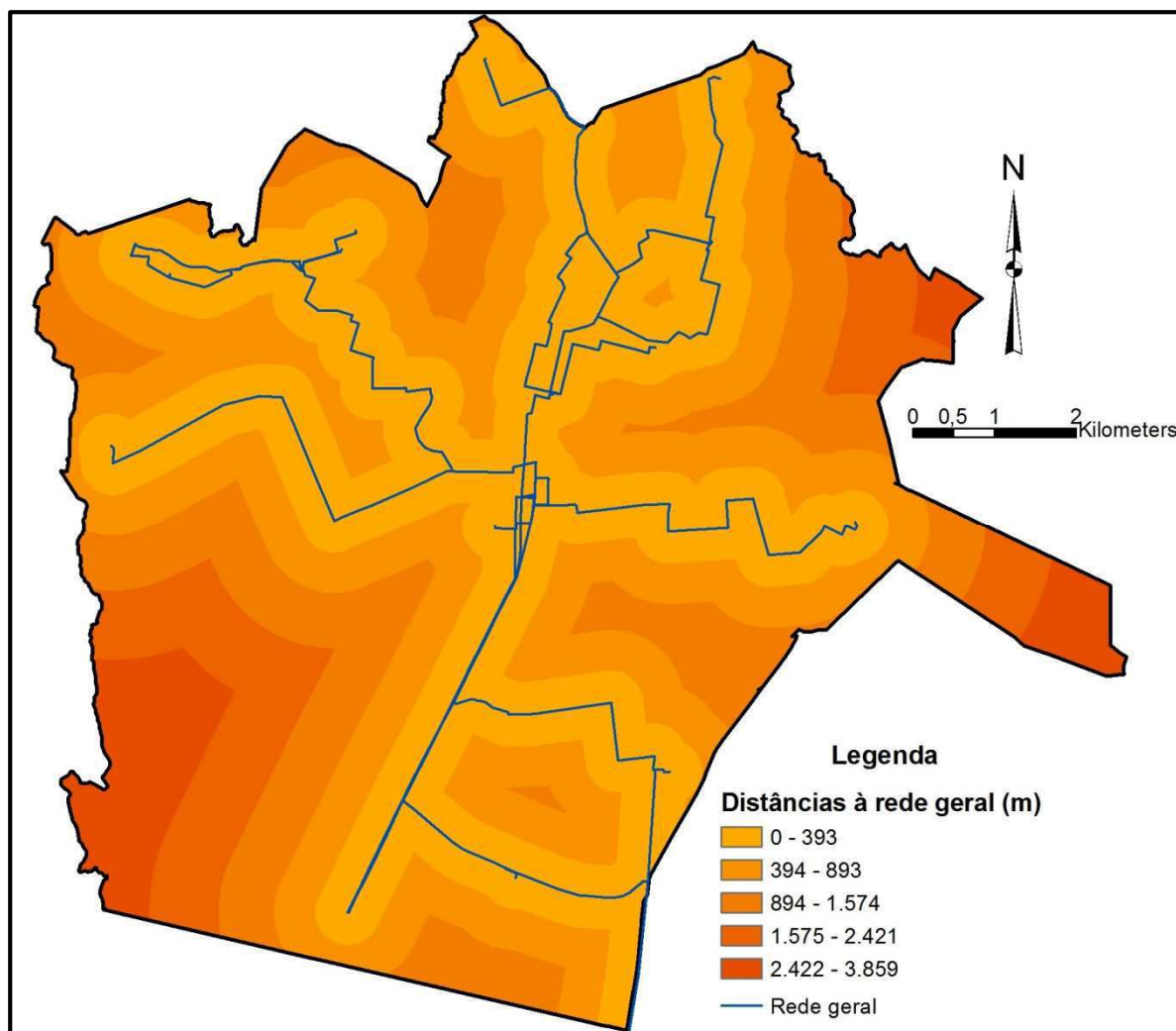


Figura 52: Distâncias à rede geral (principais condutos)

- *Volumes armazenados*

A capacidade de armazenamento de água em um SUDA depende diretamente da quantidade de unidades de reservação e da capacidade volumétrica destes. Os volumes armazenados são calculados segundo critérios de projetos, tais como: demandas, vazões, entre outros. Esse plano de informação se torna interessante na análise, visto que, possibilita ao tomador de decisão visualizar a variação da capacidade de armazenamento de água em todo limite urbano. Através da localização das unidades de reservação e dos valores do atributo volume de armazenamento, foi possível gerar uma superfície contínua a partir de métodos de interpolação presentes no SIG utilizado (Figura 53). Essa superfície foi utilizada como critério nas análises da Alternativa 2.

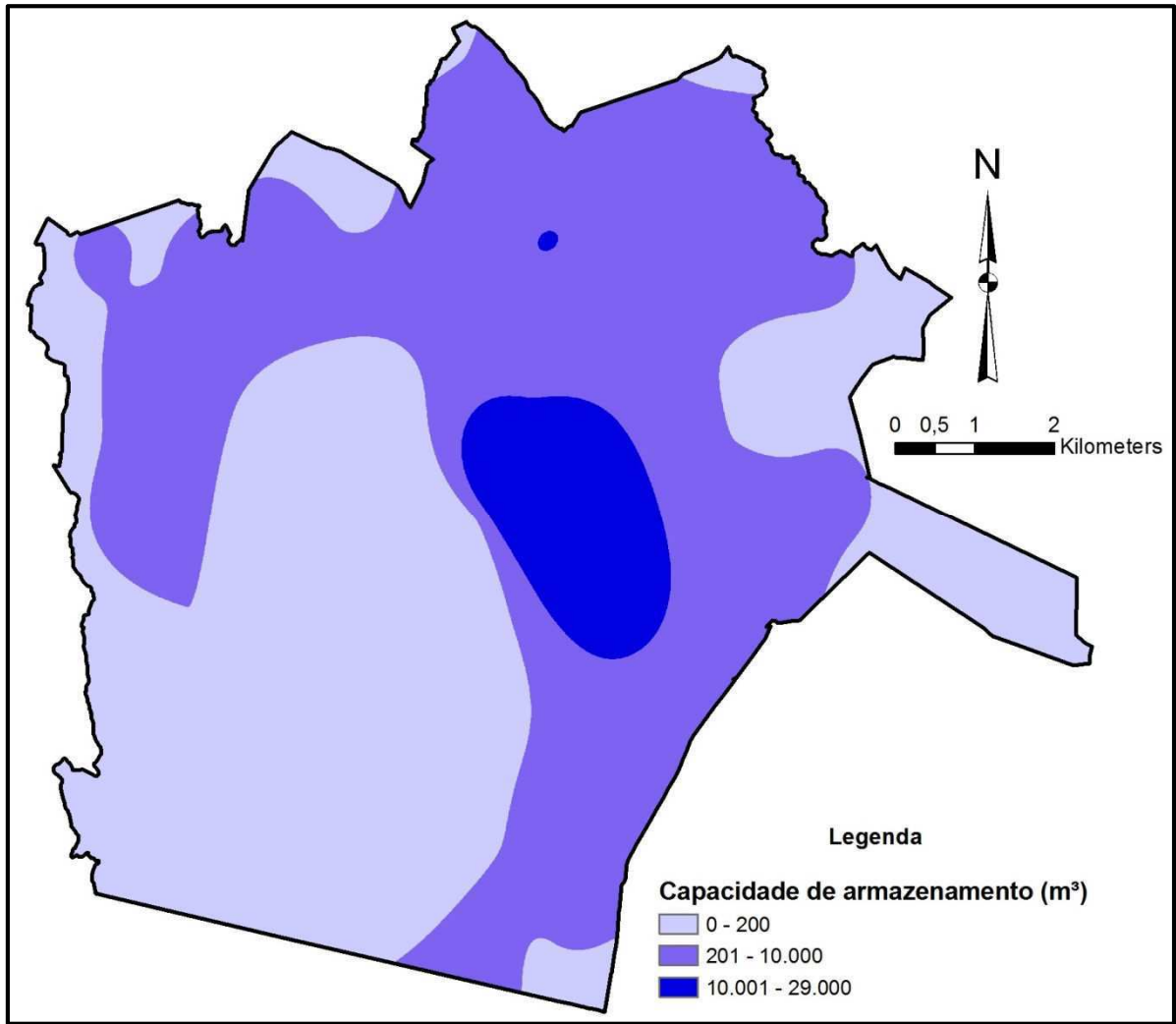


Figura 53: Representação espacial da capacidade de armazenamento do SUDA de Campina Grande, PB

Capítulo 5: Resultados e Discussões

São apresentados a seguir os resultados relativos às Alternativas 1 e 2 através dos planos de informações espaciais que correspondem a modelagem desenvolvida.

5.1 Alternativa 1: Diagnóstico da situação atual

O planejamento dos SUDA, muitas vezes, inicia-se através da verificação de diagnósticos da situação atual, identificados através de critérios de riscos que podem ser quantificados e espacializados utilizando os SIG como ferramenta de organização e análise.

Um diagnóstico permite a avaliação de prováveis riscos a desabastecimento, pois consideram aspectos que relacionam oferta e demanda, tais como: população, distâncias, topografia, entre outros. Por exemplo: sabe-se que quanto maior a distância de um reservatório (oferta) dos usuários (demanda), mesmo em condições de favorabilidade hidráulica (vazões e pressões adequadas) o risco a desabastecimento poderá ser maior quando comparado com situações inversas.

A análise da situação atual pode ser baseada em informações sobre os diversos elementos que compõem os SUDA. Muitas vezes, o diagnóstico pode ser limitado em razão da escassez de informações ou até mesmo da não disponibilidade destas. Ademais, um diagnóstico servirá como diretriz para um adequado planejamento em fases de expansão dos SUDA.

Assim, a Alternativa 1 tem como proposta a realização de um diagnóstico da situação atual dos SUDA em relação às unidades de reservação da área de estudo. Toda a análise foi realizada sob o ponto de vista de riscos a desabastecimentos.

Segundo informações derivadas de conversas com técnicos da CAGEPA existem áreas que sofrem com uma distribuição de água não adequada aos usuários. A falta de adequação no atendimento do serviço pode ser ocasionada por motivos operacionais, como por exemplo, baixas pressões ou ainda por motivos sociais e geográficos, como o distanciamento de domicílios mais periféricos.

Muitas vezes, a disponibilidade de dados é um fator limitante para uma análise que se aproxime mais da realidade. Neste contexto, as análises foram realizadas com as informações disponíveis.

Os critérios utilizados na Alternativa 1, a saber: Alturas geométricas, Distâncias às unidades de reservação, População residente, Domicílios abastecidos pela rede geral, foram adequados segundo uma função de normalização, tornando possível a combinação dessas informações. A normalização transforma os planos de informação em uma mesma unidade de medida, em função da adequação de cada critério à hipótese formulada. Por exemplo, metros de coluna de água não podem ser somados com números populacionais.

Utilizaram-se conjuntos difusos nas análises, os quais geram possibilidades de cada célula pertencer a uma função de pertinência estabelecida. Os conjuntos difusos se caracterizam por não possuírem limites definidos e a transição entre a pertinência ou não pertinência de uma posição é gradual. Geralmente, em Sistemas de Informação Geográfica, as seguintes funções de normalização são consideradas: a função sigmoïdal e a função linear.

Neste trabalho, um conjunto difuso é caracterizado pelo grau de pertinência que varia de 0 a 10, indicando um aumento contínuo de uma situação de não pertinência para uma de total pertinência. A adequação foi classificada em faixas para caracterizar à hipótese formulada: *baixo, médio e alto*.

Por conseguinte, considerando que as áreas com alturas geométricas menores são áreas susceptíveis a riscos de desabastecimento. Ou seja, quanto menor o valor da altura geométrica, mais adequada à hipótese formulada.

Portanto, as funções lineares de normalização para esta hipótese são apresentadas na Figura 54. As Figuras 55 a 56 expõem os resultados da normalização do critério altura geométrica através de uma função linear decrescente aplicada em todas as células para as áreas de influência das unidades de reservação analisadas.

Sabe-se que quanto maiores são as distâncias entre os usuários e as unidades de reservação, maiores são os riscos a desabastecimento, pois as pressões na rede de distribuição diminuem ao longo das distâncias alcançadas. Além disso, em áreas situadas a grandes distâncias, a rede secundária de distribuição pode ser ausente ou apresentar problemas de continuidade de abastecimento.

Assim, quanto maiores as distâncias, mais adequada à hipótese formulada. As funções de normalização do critério supracitado para as unidades de reservação analisadas estão apresentada na Figura 57. As Figuras 58 a 59 mostram os valores

normalizados à análise por meio de uma função linear crescente aplicada em todas as células para as áreas de influência das unidades de reservação analisadas.

Outro critério avaliado na modelagem foi a população residente. Assumindo-se que em áreas com altos números populacionais existem maiores demandas de água, pode-se supor, portanto, maiores riscos a desabastecimento. De tal modo, a normalização desse critério pode ser realizada através de uma função linear crescente (Figura 60).

Os resultados para a normalização do critério população, realizada por meio de uma função linear crescente aplicada em todas as células para as áreas de influência das unidades de reservação analisadas, podem ser visualizados na Figura 61 e na Figura 62.

O número de domicílios atendidos pela rede geral de distribuição de água também poderá influenciar no risco a desabastecimento (pode ser um indicador de existência de áreas não servidas).

A não existência de ligação dos domicílios à rede geral pode também apontar problemas gerais no abastecimento de água, dentre os quais podem estar incluídos, a descontinuidade do abastecimento ou a oferta local de fontes alternativas de captação. Deste modo, a normalização deste critério será realizada através de uma função linear decrescente (Figura 63).

Após normalização, foram obtidos os resultados para todas as células nas unidades de reservação analisadas, os quais podem ser visualizados nas Figuras 64 e 65.

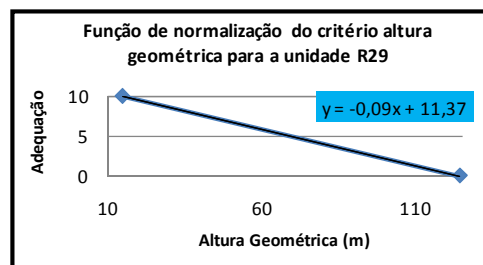
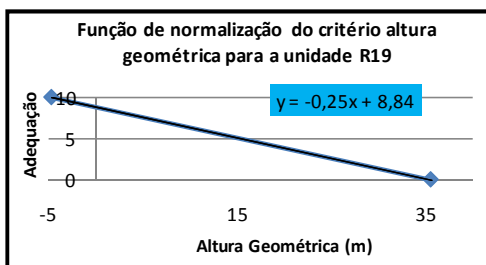
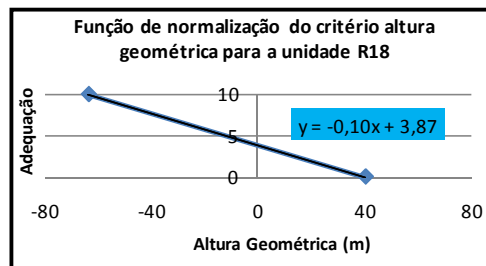
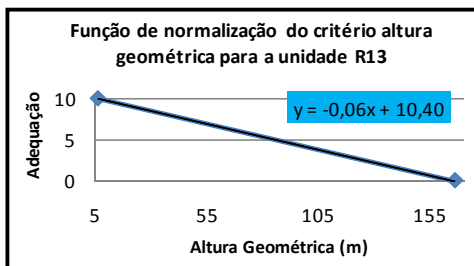
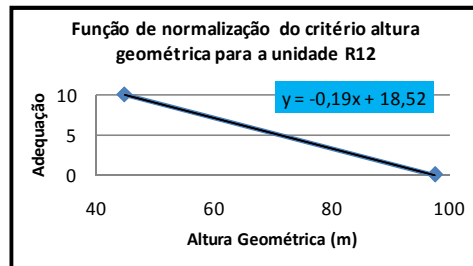
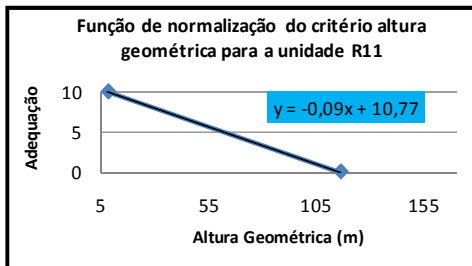
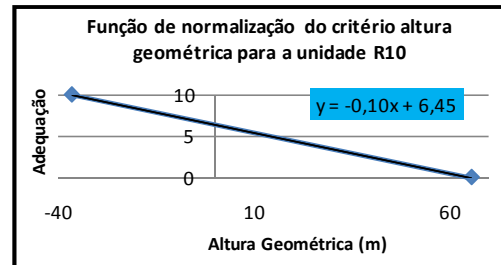
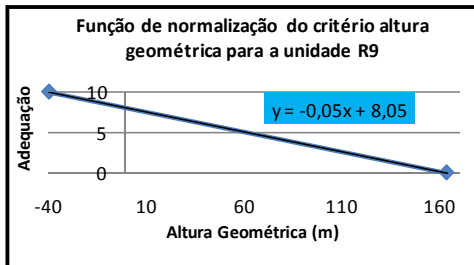
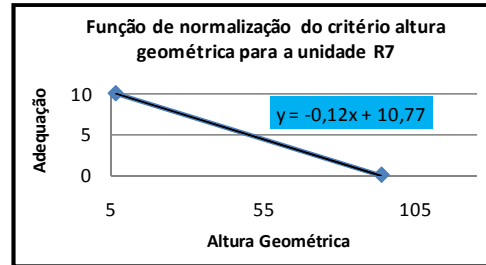
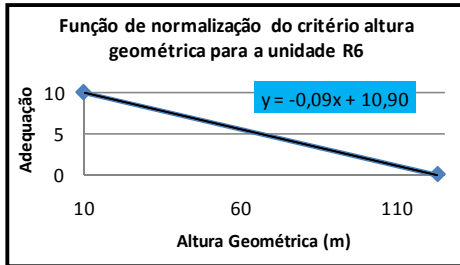
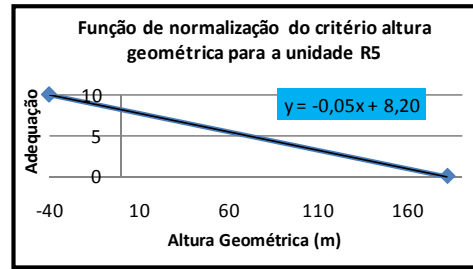
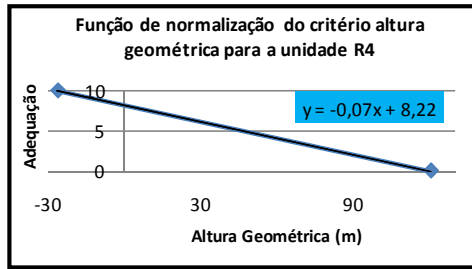


Figura 54: Funções de normalização linearmente decrescentes do critério altura geométrica para as unidades de reservação analisadas

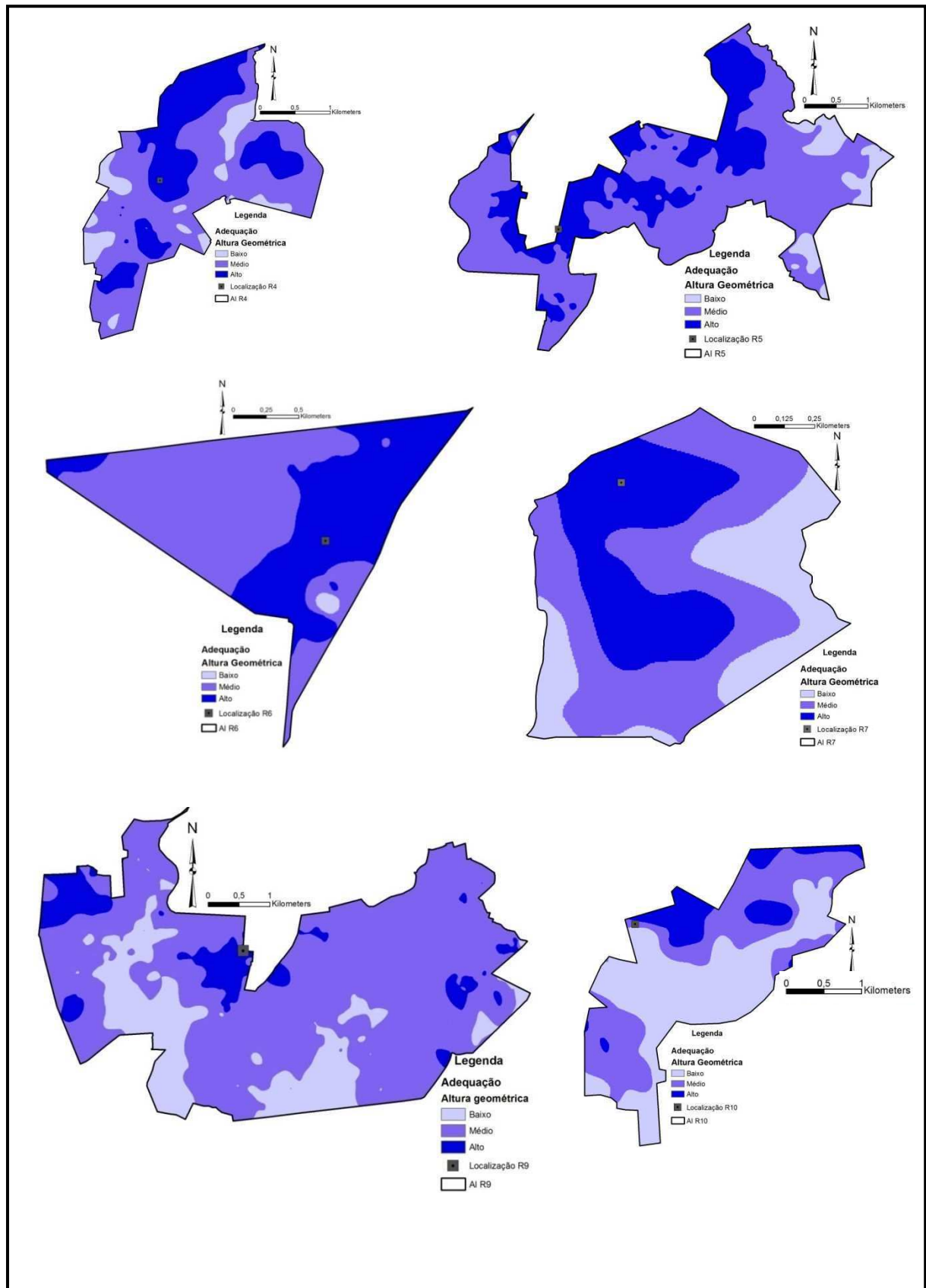


Figura 55: Mapas de alturas geométricas normalizados para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificados em faixas de riscos a desabastecimento para as unidades de reserva analisadas

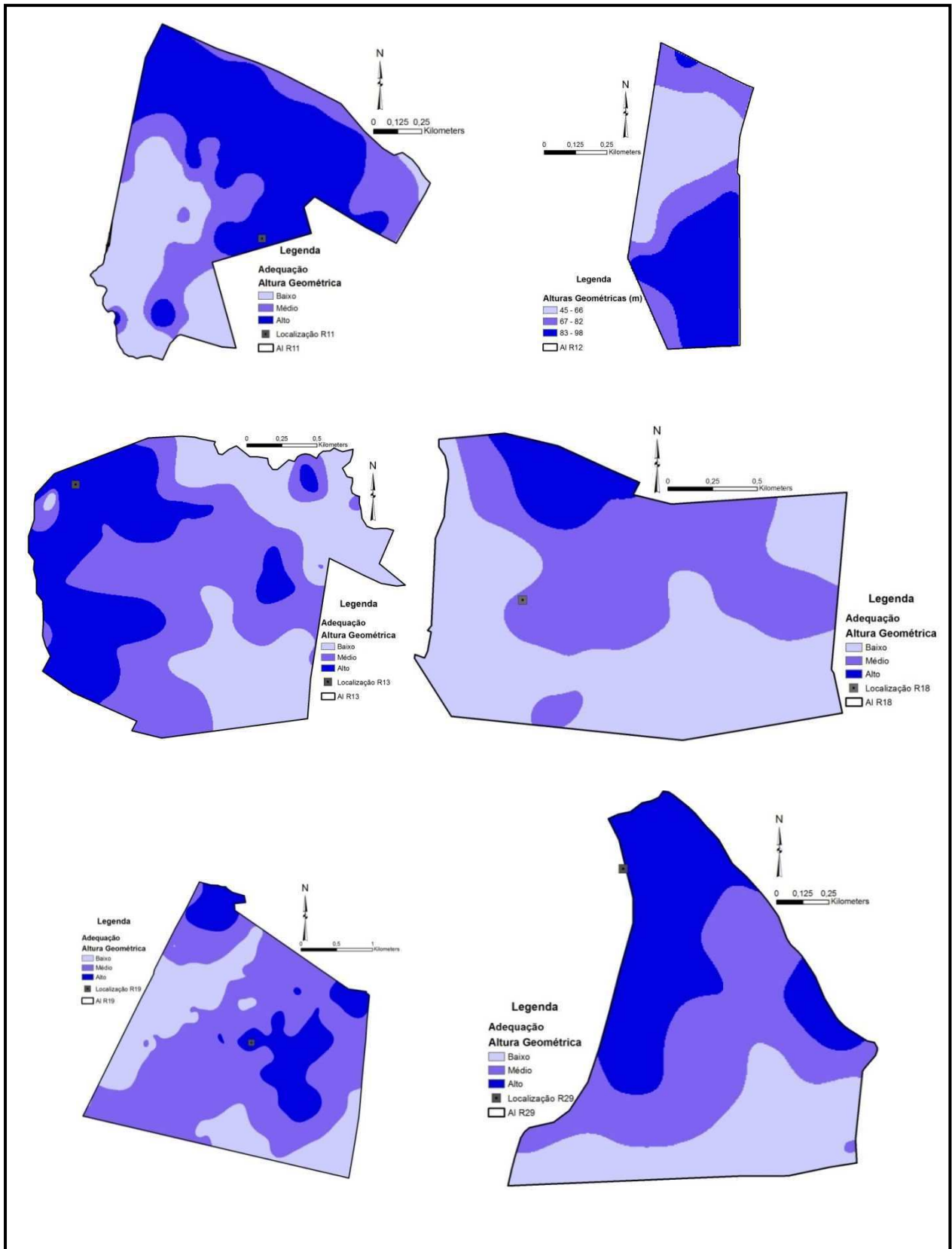


Figura 56: Mapas de alturas geométricas normalizados para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificados em faixas de riscos a desabastecimento para as unidades de reserva analisadas (continuação)

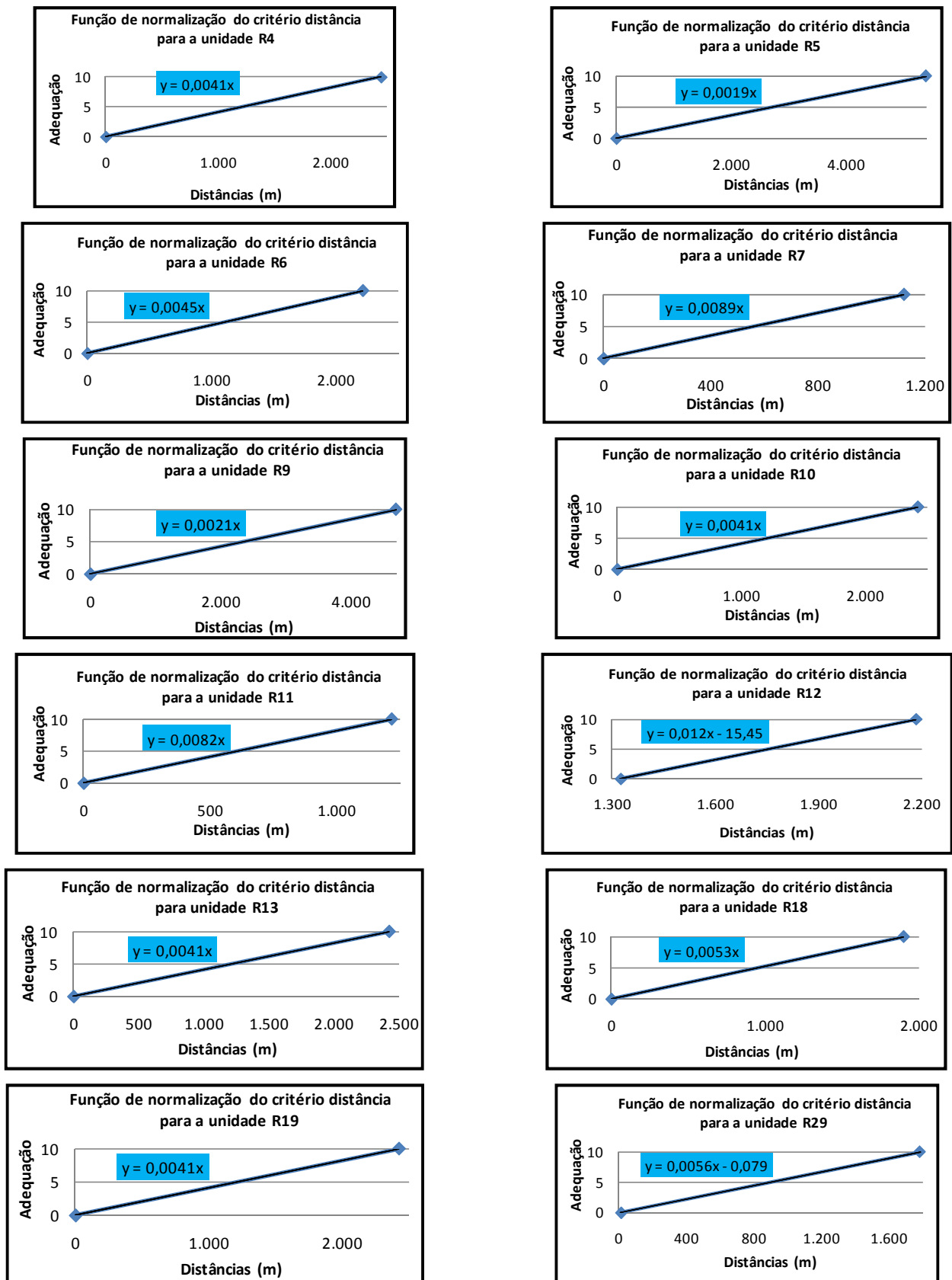


Figura 57: Funções de normalização linearmente crescentes do critério distâncias para as unidades de reservação analisadas

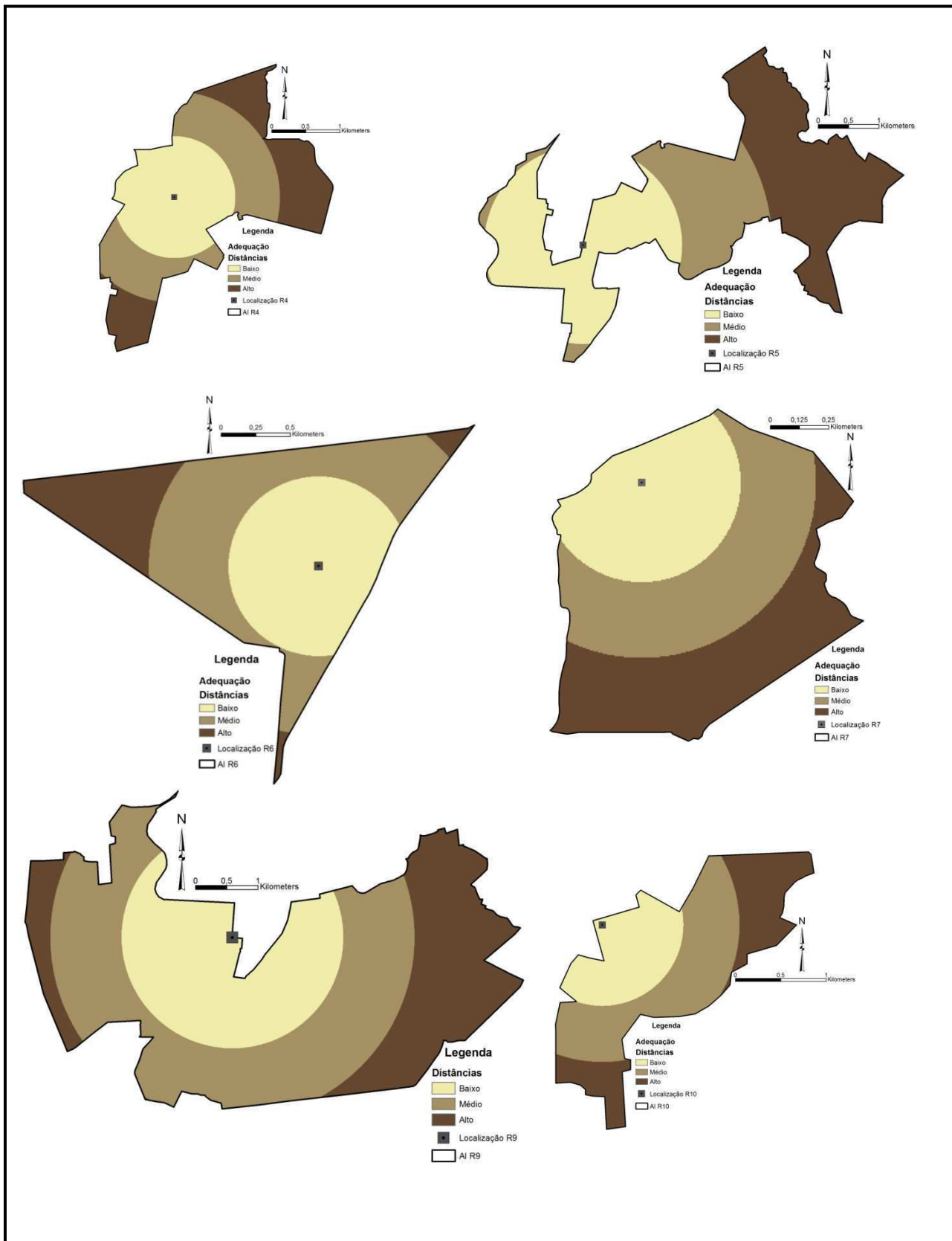


Figura 58: Mapas de distâncias normalizados para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificados em faixas de riscos a desabastecimento para as unidades de reservação analisadas

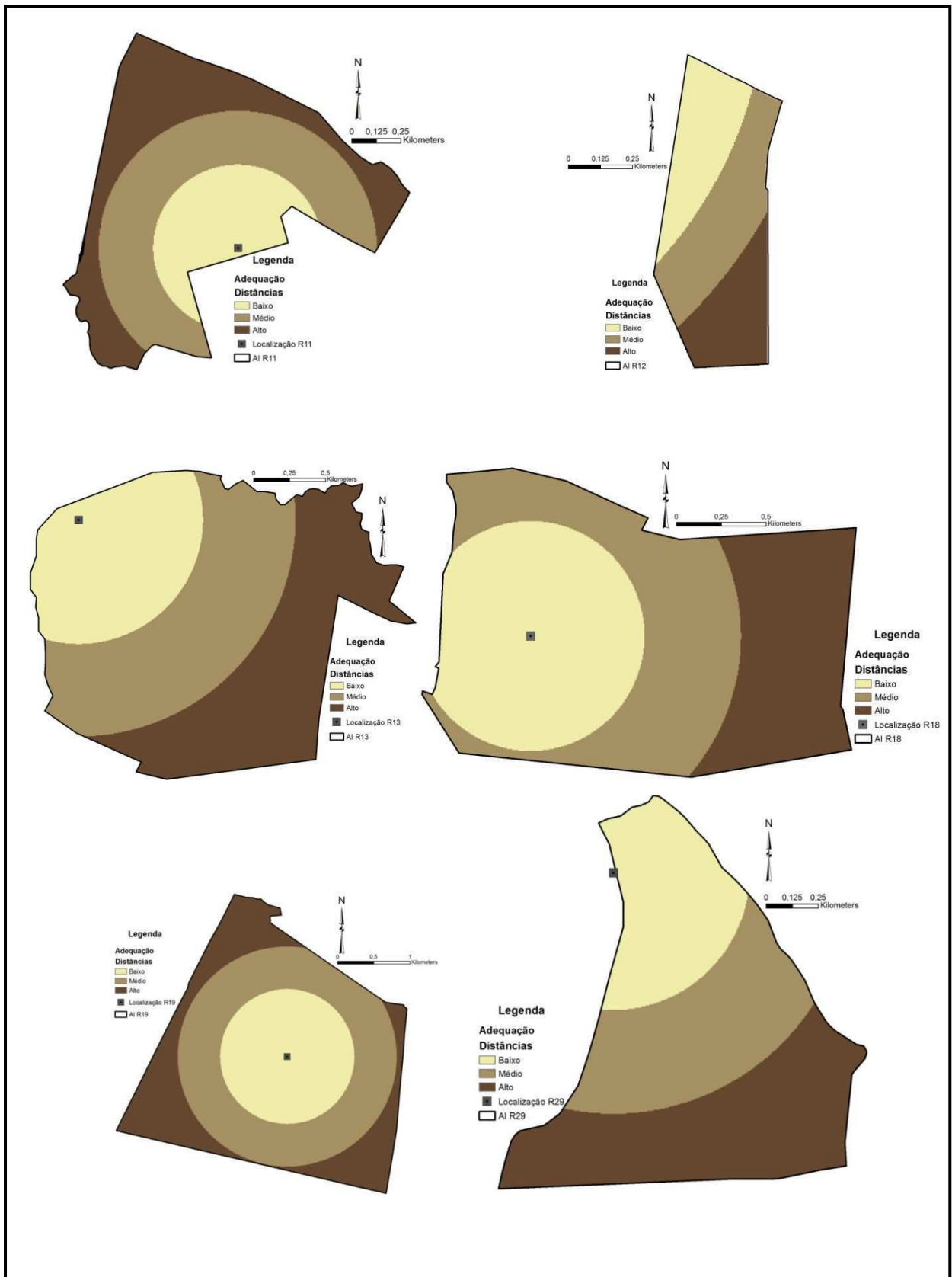


Figura 59: Mapas de distâncias normalizados para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificados em faixas de riscos a desabastecimento para as unidades de reservação analisadas (continuação)

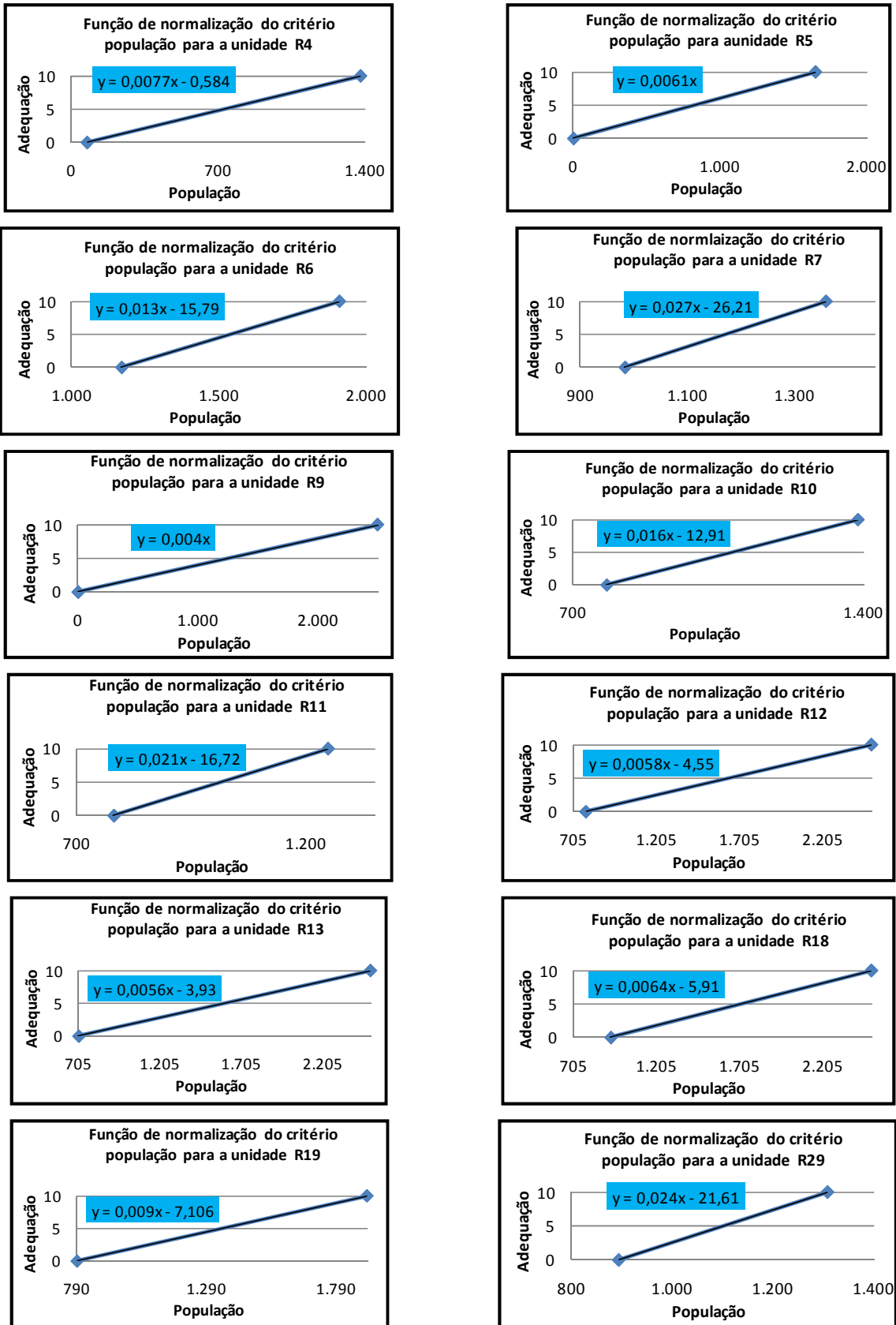


Figura 60: Funções de normalização linearmente crescente do critério população para as unidades de reservação analisadas

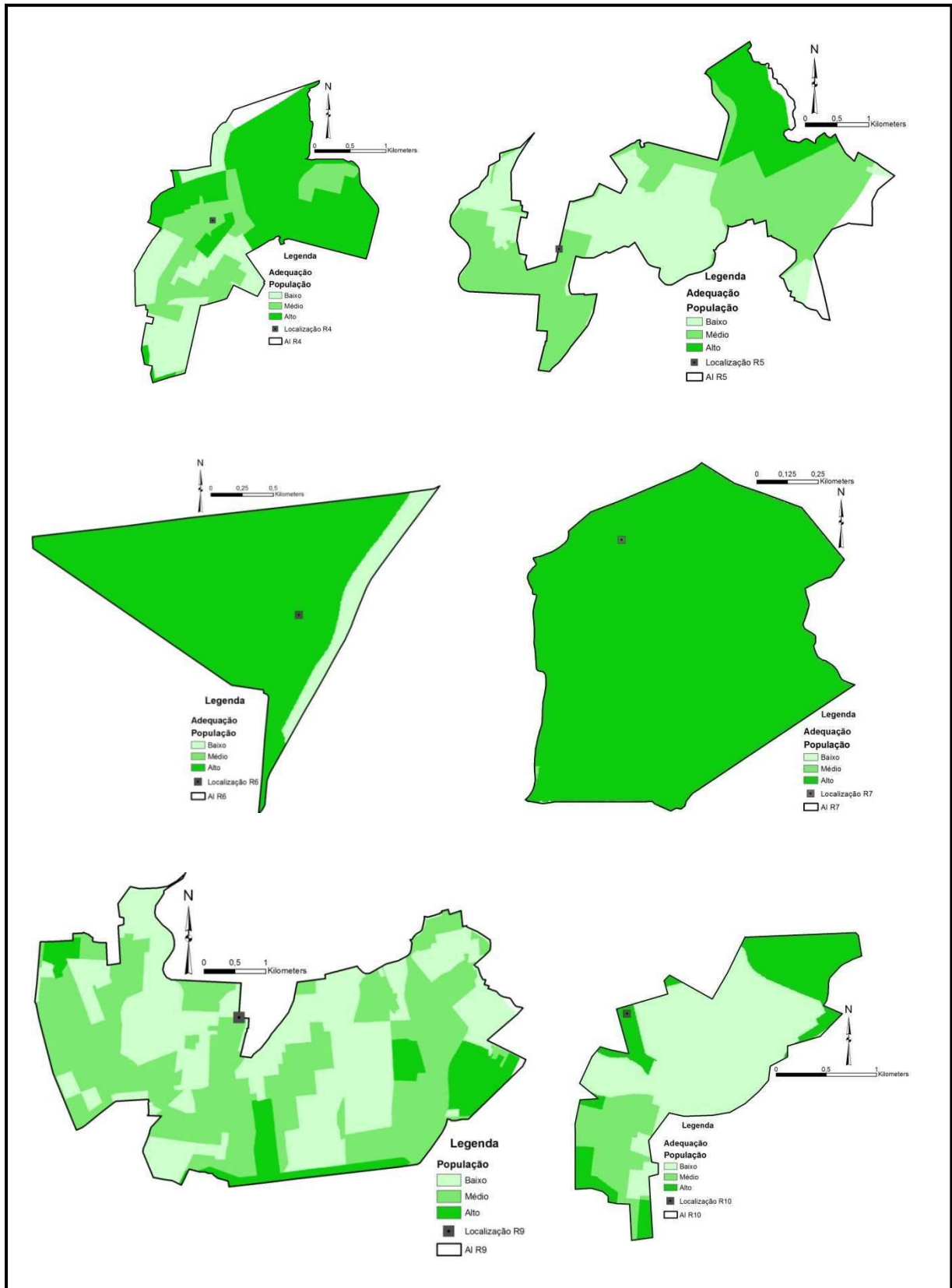


Figura 61: Mapas de números populacionais normalizados para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente crescente e classificados em faixas de riscos a desabastecimento para as unidades de reserva analisadas

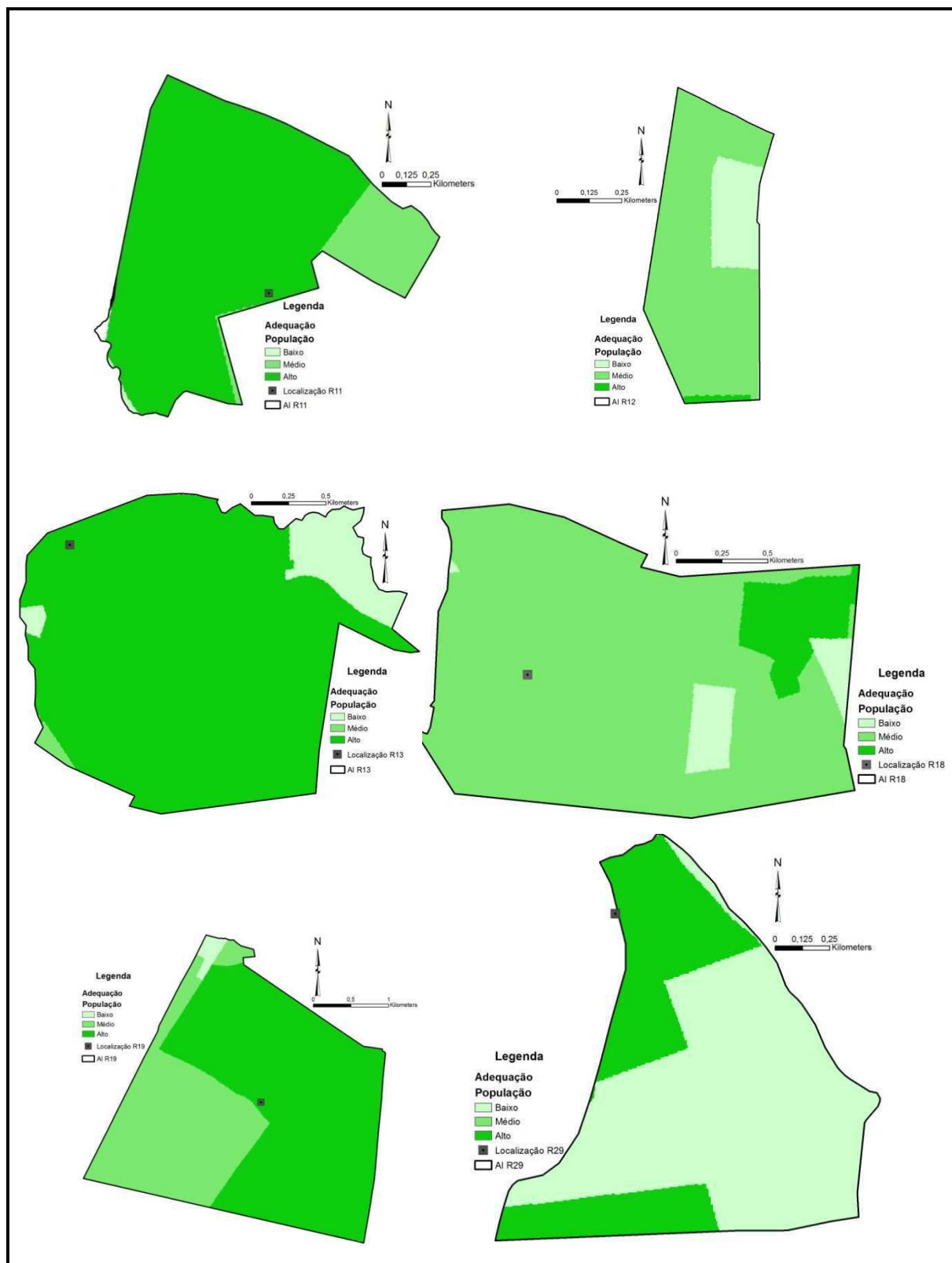


Figura 62: Mapas de números populacionais normalizados para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente crescente e classificados em faixas de riscos a desabastecimento para as unidades de reservação analisadas (continuação)

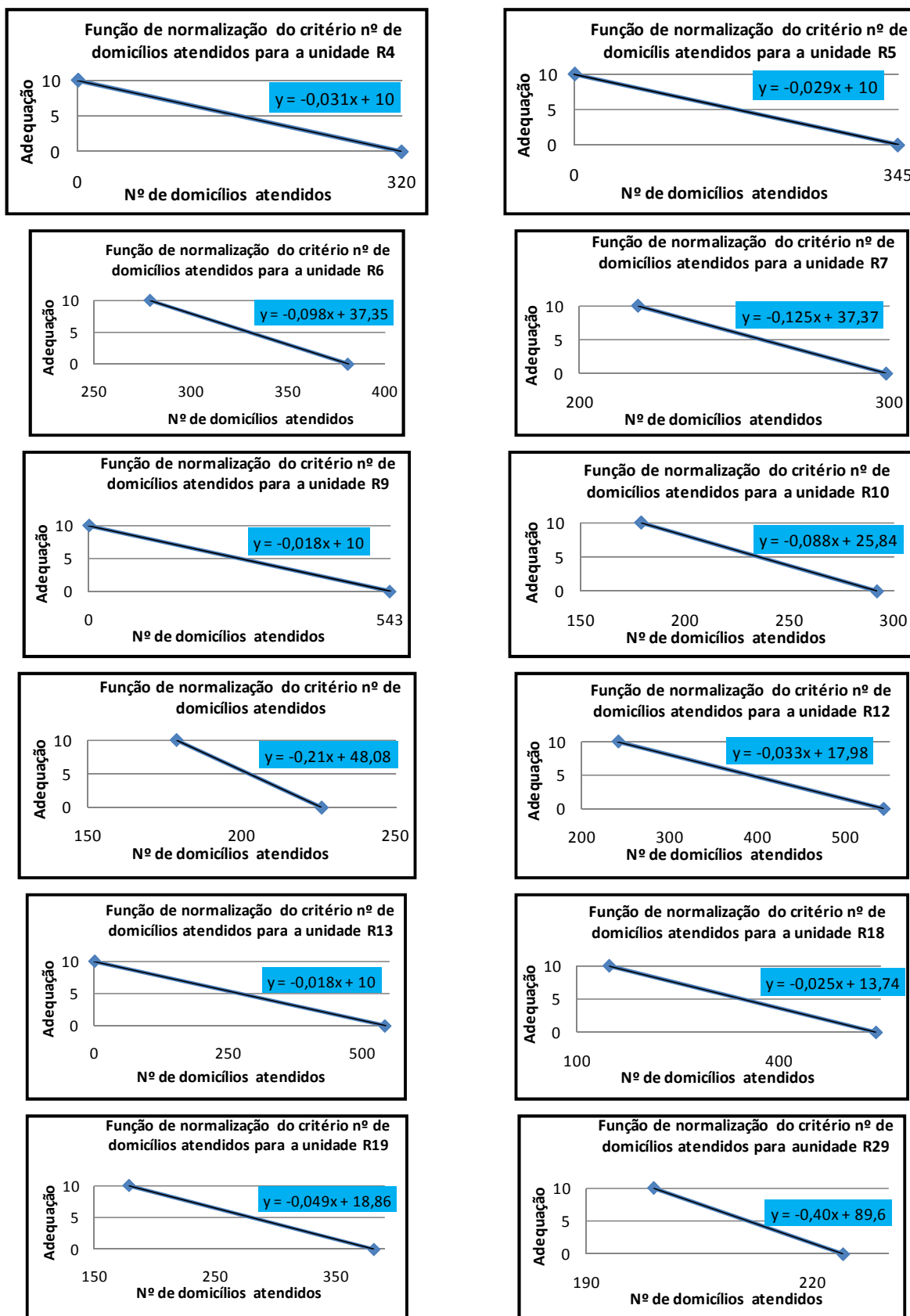


Figura 63: Funções de normalização linearmente decrescente do critério Nº de domicílios atendidos para as unidades de reserva analisadas

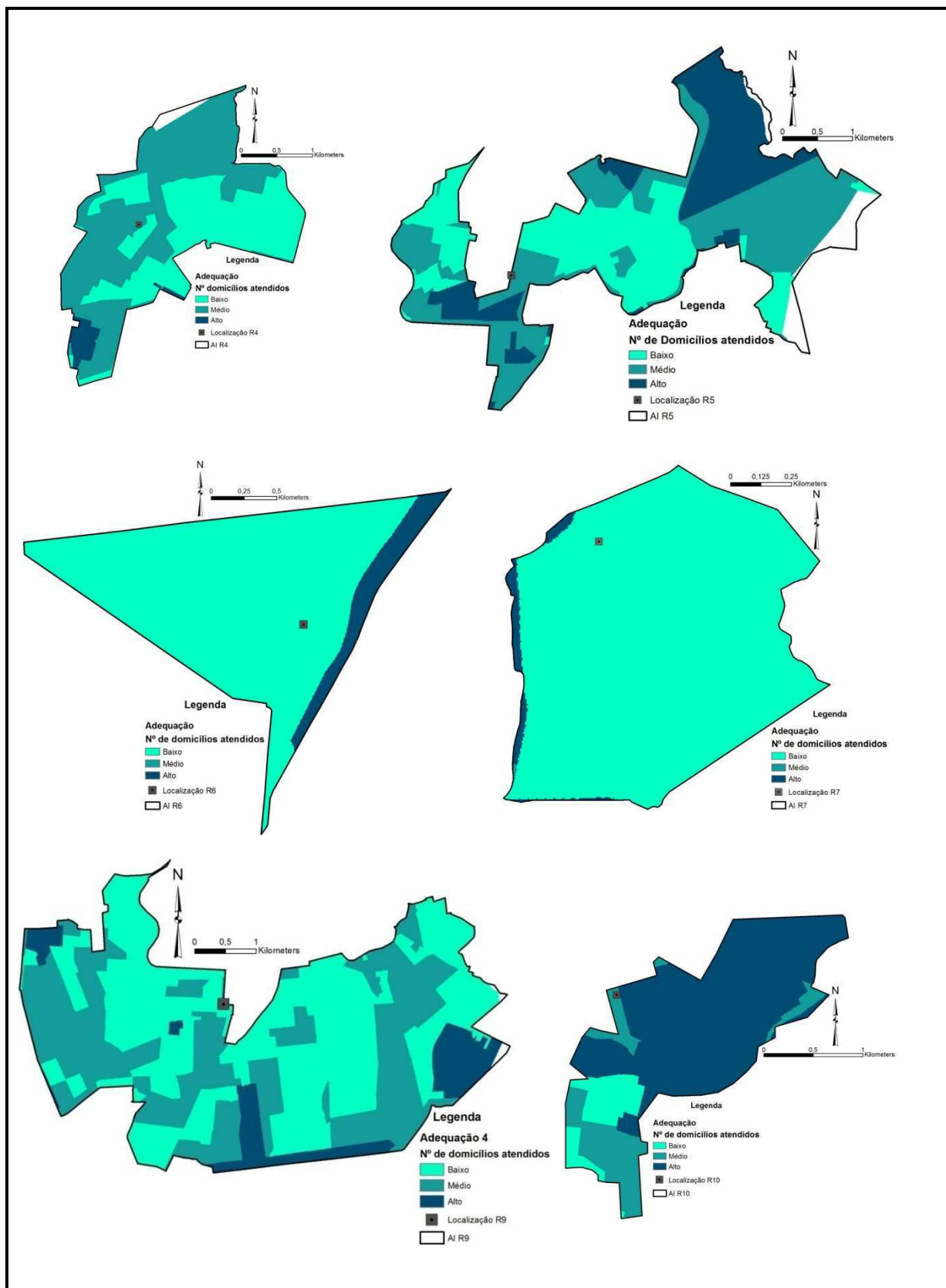


Figura 64: Mapas de números de domicílios normalizados para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificados em faixas de riscos a desabastecimento para as unidades de reserva analisadas



Figura 65: Mapas de números de domicílios normalizados para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificados em faixas de riscos a desabastecimento para as unidades de reserva analisadas (continuação)

A partir da geração de todos os planos de informações, realizou-se a análise multicriterial, a qual se caracteriza como uma combinação ponderada entre os critérios normalizados. A análise se limita a restrição estabelecida, ou seja, nas áreas urbanas ocupadas (lotes). O critério restritivo pode ser visualizado na Figura 50. A contribuição (pesos) de cada critério à análise foi avaliada segundo métodos heurísticos e está representada algebricamente através da Equação 2. Ressalta-se que foram realizados diversos testes para aferir a eleição dos pesos de cada critério.

$$\{[(0,4x \textit{ Altura Geométrica}) + (0,2x \textit{ Distância}) + (0,2x \textit{ População}) + (0,2x \textit{ N}^\circ \textit{ de domicílio})] x \textit{ lotes}\} \quad (\text{Equação 2})$$

Sabe-se que cada área de influência das unidades de reservação possui certas peculiaridades. Por exemplo, algumas apresentam uma maior densidade populacional, outras uma maior variação em suas características altimétricas. Portanto, no momento de escolha dos pesos de cada critério, cada área poderá receber pesos diferentes, dependendo de suas características mais acentuadas. No entanto, neste estudo, considerou as características em cada área de forma generalizada. Assim, os pesos de cada critério foram os mesmos para todas as unidades de reservação avaliadas.

Os resultados obtidos identificam áreas ocupadas submetidas a risco de desabastecimento de água, apresentadas segundo faixas que indicam em ordem crescente o risco avaliado, a saber: baixo, médio, alto (Figura 66 à Figura 77).

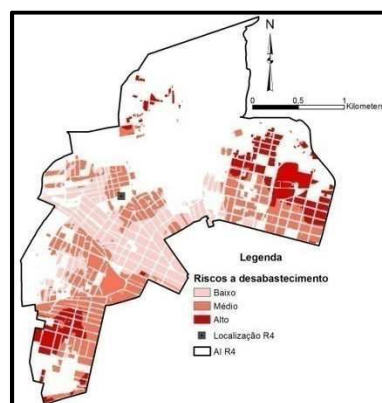


Figura 66: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R4

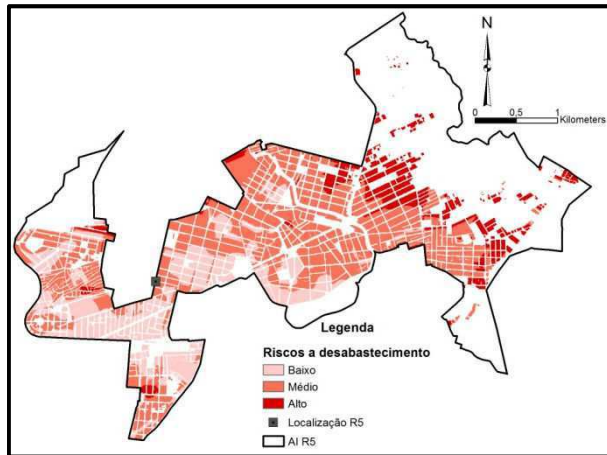


Figura 67: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R5

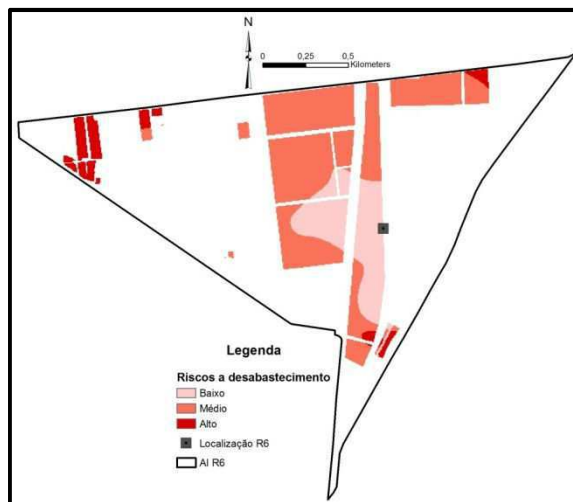


Figura 68: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R6

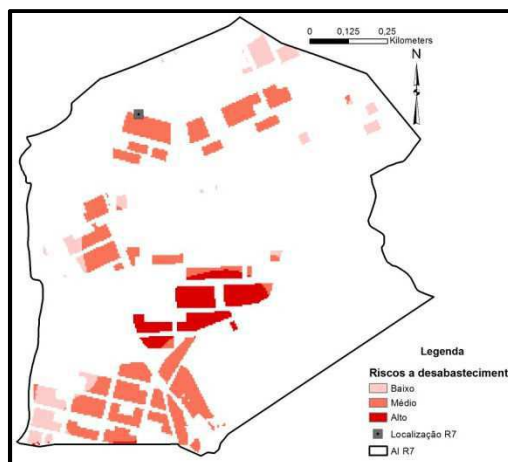


Figura 69: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R7

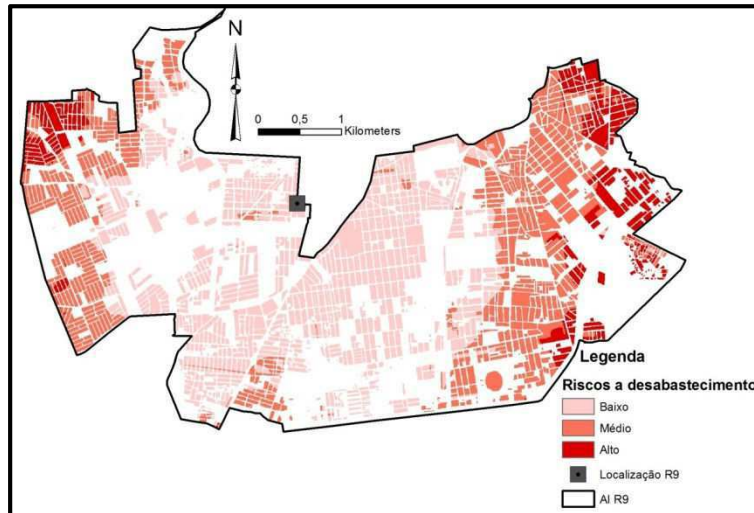


Figura 70: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R9

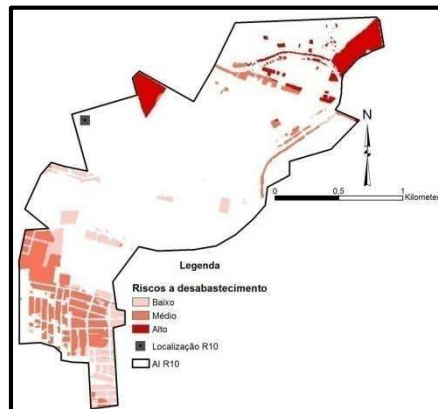


Figura 71: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R10

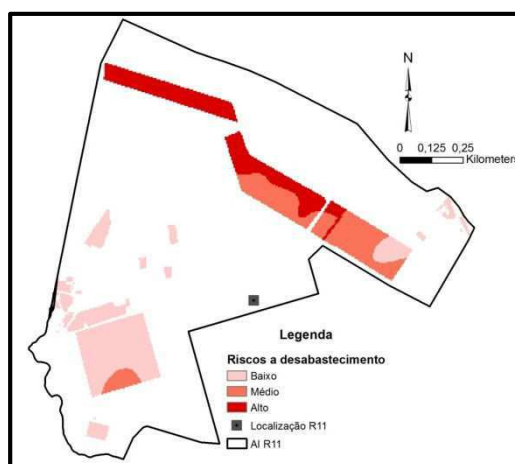


Figura 72: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R11

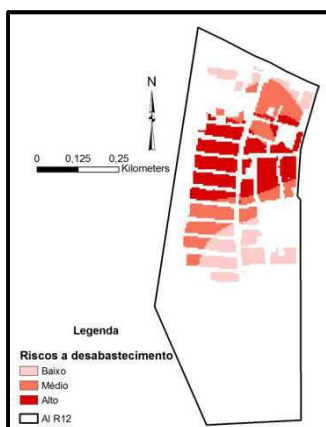


Figura 73: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R12

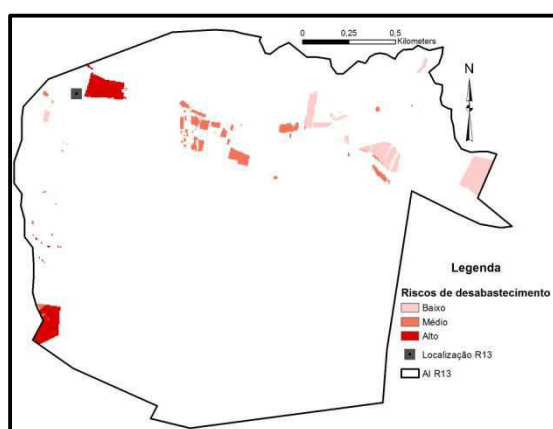


Figura 74: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R13



Figura 75: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R18

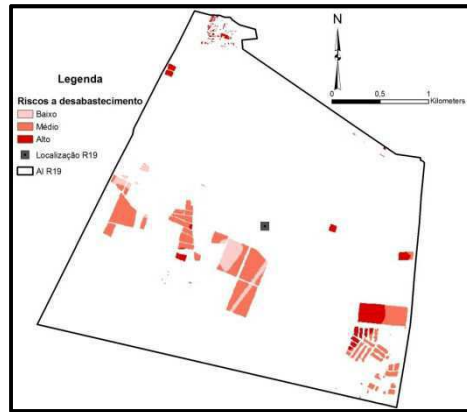


Figura 76: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R19

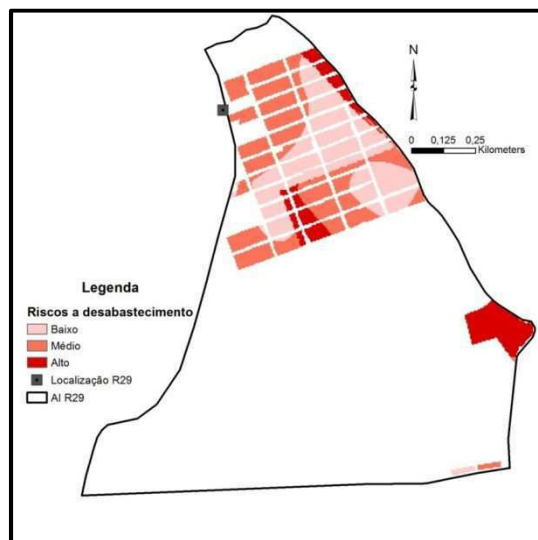


Figura 77: Riscos de desabastecimento de água segundo análise multicriterial para a unidade de reservação R29

Os resultados espacializados de riscos a desabastecimento de água segundo múltiplos critérios tornam-se um interessante artifício no processo de tomada de decisão. Por exemplo, a escolha de prioridades pode se tornar mais eficiente quando se observa áreas sujeitas a médios e altos riscos.

5.2 Alternativa 2: Simulação de zonas para localizar novas unidades

A proposta da Alternativa 2 é realizar simulações que indiquem melhores zonas para localizar novas unidades de reservação com vistas a necessidade de ampliação da rede de distribuição de água ocasionada pela expansão urbana.

As análises foram realizadas utilizando como limites o zoneamento de pressões: Zona A, Zona B, Zona C e Zona D. O critério restritivo são os vazios urbanos, obtidos através de uma operação de subtração entre o mapa de limite urbano e os lotes existentes.

Com a hipótese formulada de encontrar zonas ótimas para localizar novas unidades de reservação, os critérios utilizados foram normalizados e ponderados, assim como na Alternativa 1. Foram utilizados três critérios: altimetria (representado através do MNT), distâncias à rede geral e volumes armazenados. O grau de pertinência variou de 0 a 10 e foram classificados em faixas que caracterizam à hipótese formulada: *áreas não recomendadas e áreas ótimas*. Neste sentido, a normalização do critério Altimetria será alcançada através de uma função linearmente crescente (Figura 78), pois em áreas que possuem altos valores altimétricos se tornam mais adequadas para uma disposição espacial otimizada das unidades de reservação. As Figura 79 Figura 82 apresentam a adequação espacial através das funções de normalização determinadas para o critério altimetria aplicadas às Zonas analisadas.

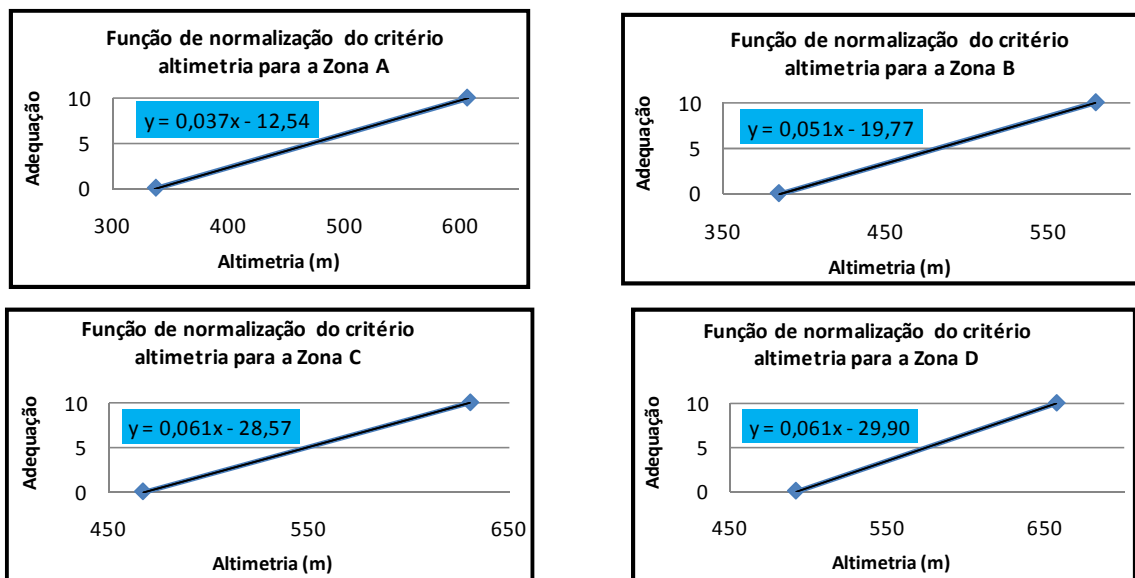


Figura 78: Funções de normalização do critério altimetria para as zonas analisadas

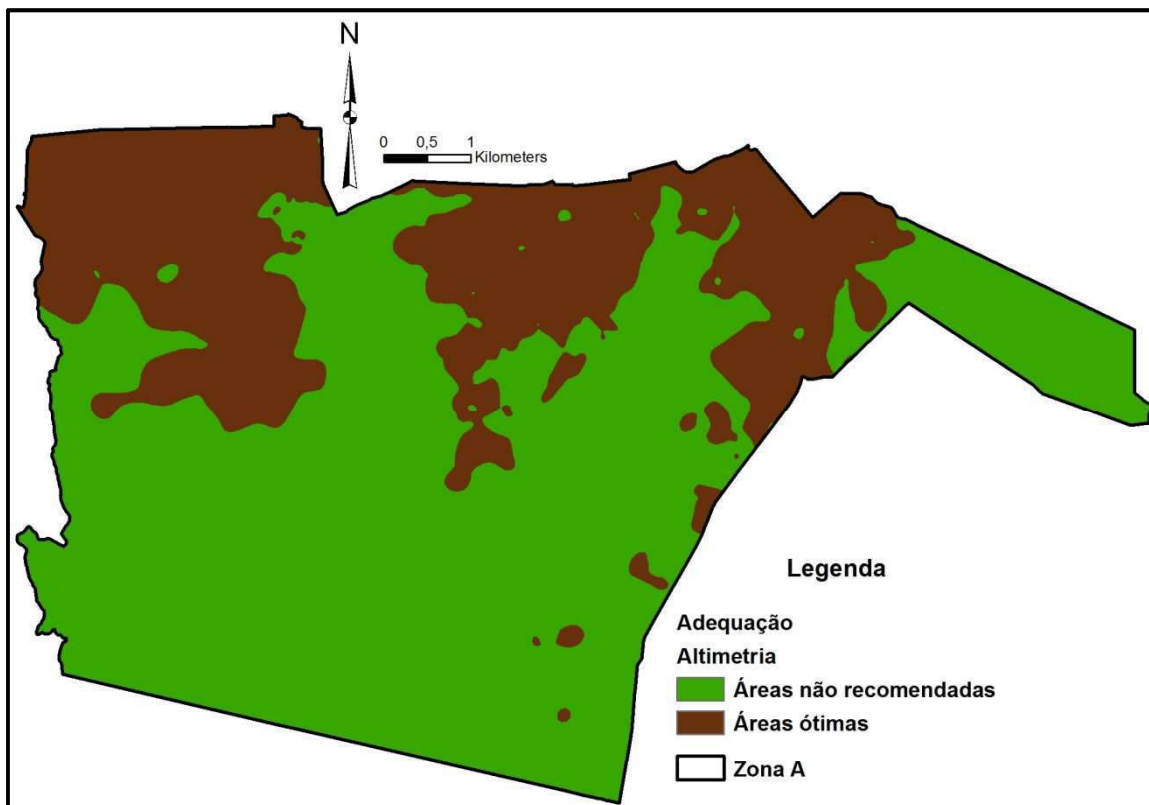


Figura 79: Mapa de altimetria normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente crescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona A

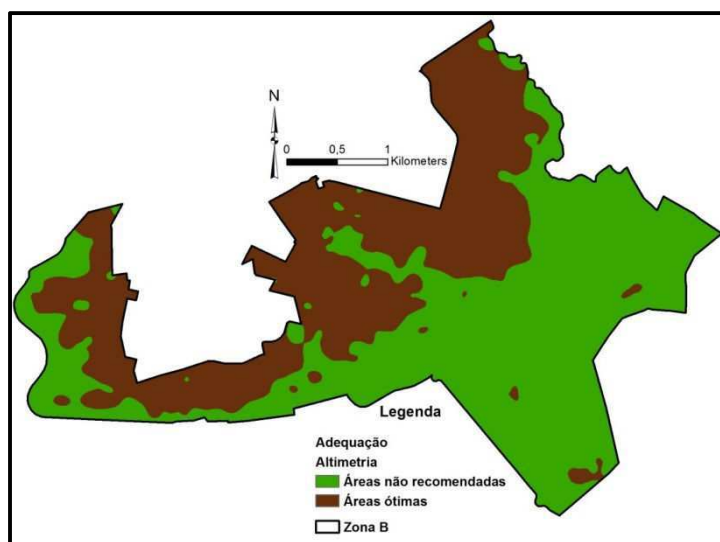


Figura 80: Mapa de altimetria normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente crescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona B

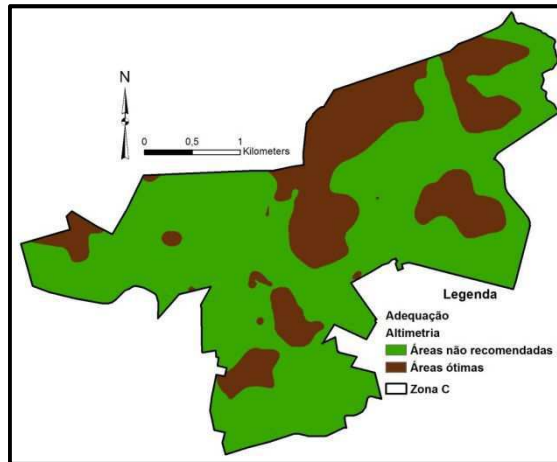


Figura 81: Mapa de altimetria normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente crescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona C

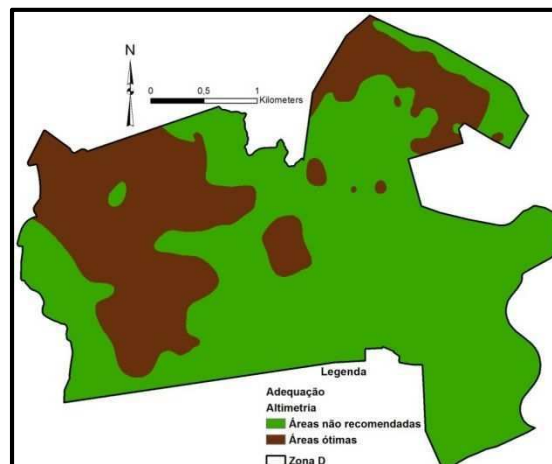


Figura 82: Mapa de altimetria normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente crescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona D

Na implantação de novas unidades de reservação, um critério que pode ser considerado são as distâncias da rede geral aos eventuais usuários do serviço. Por exemplo, os custos de implantação da rede de distribuição aumentam quando o usuário se situa a grandes distâncias. Neste sentido, as áreas mais adequadas à hipótese formulada são aquelas que estão pouco distantes do usuário. Assim, as funções de normalização para esse critério são linearmente decrescentes (Figura 83). As Figuras 84 a 87 apresentam os resultados em mapas para a normalização do critério supracitado.

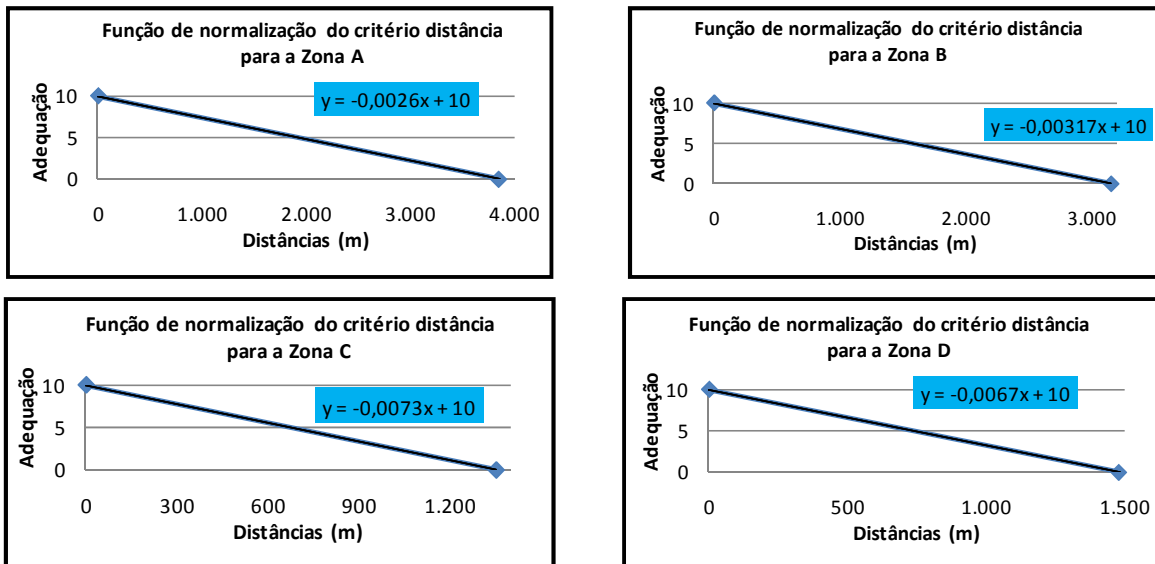


Figura 83: Funções de normalização do critério distâncias à rede geral para as zonas analisadas

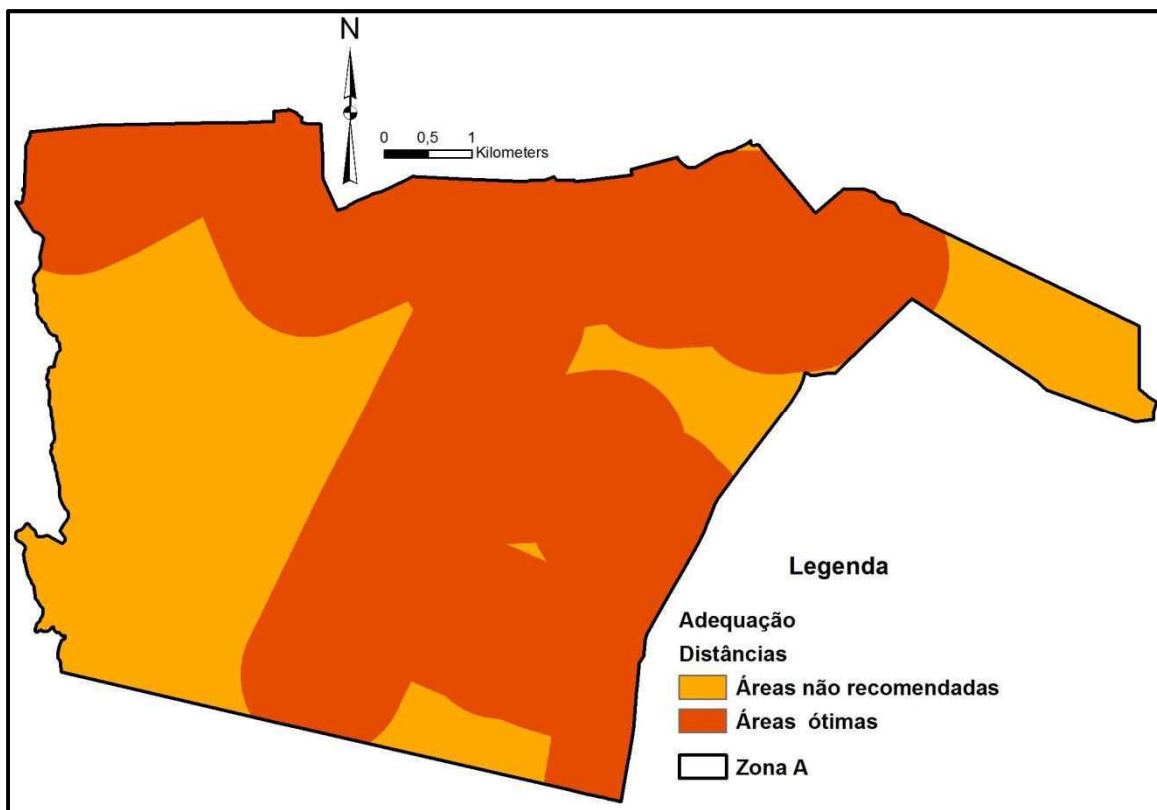


Figura 84: Mapa de distâncias normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona A

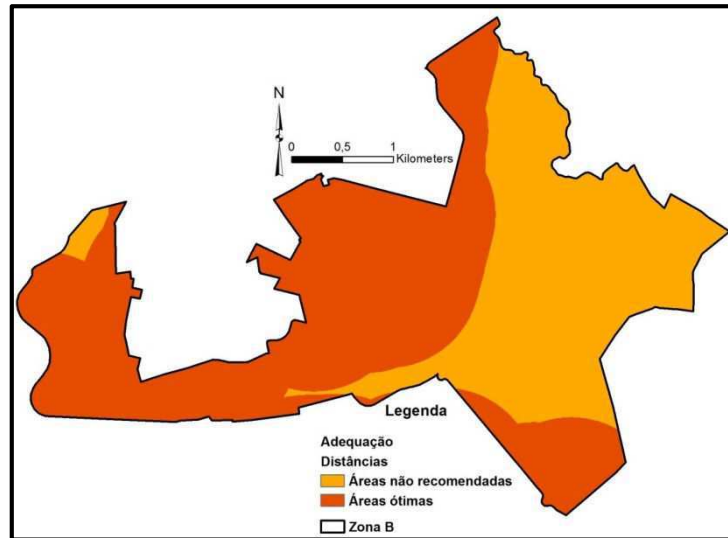


Figura 85: Mapa de distâncias normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona B

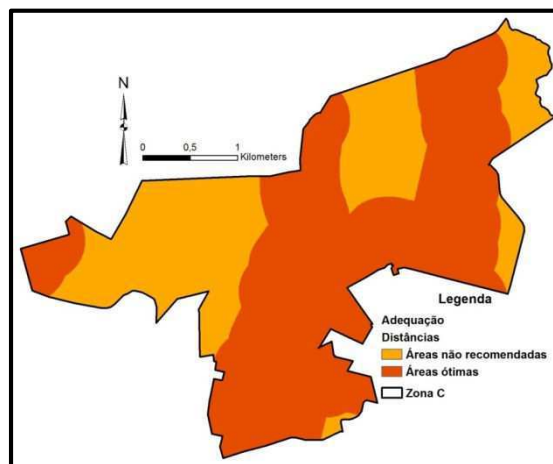


Figura 86: Mapa de distâncias normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona C

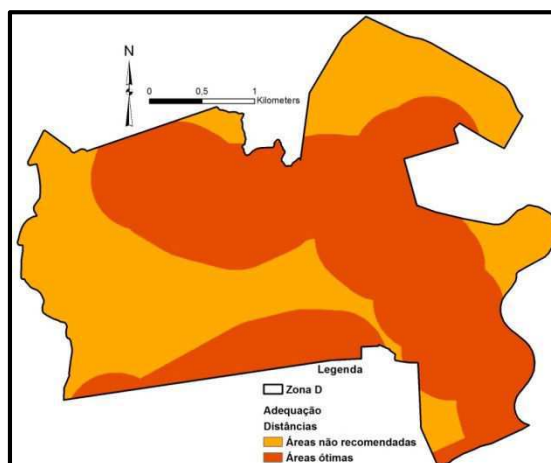


Figura 87: Mapa de distâncias normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona B

Outro critério utilizado na análise da Alternativa 2 foram os volumes armazenados nas unidades de reservação já instaladas e operadas no sistema estudado. Esse critério pode representar uma tendência da necessidade de implantação de novas unidades, tendo em vista que é possível visualizar zonas com pouca ou nenhuma capacidade de armazenamento de água. Nestas zonas é possível que exista uma menor garantia na prestação do abastecimento de água, pois o abastecimento é realizado por fontes alternativas, como poços ou por unidades de reservação de outras zonas. Deste modo, valores menores de volumes armazenados são mais adequando a hipótese formulada. Logo a normalização é realizada por uma função linearmente decrescente (Figura88). Os mapas obtidos através das funções de normalizações encontradas podem ser visualizados nas Figuras 89 a 92.

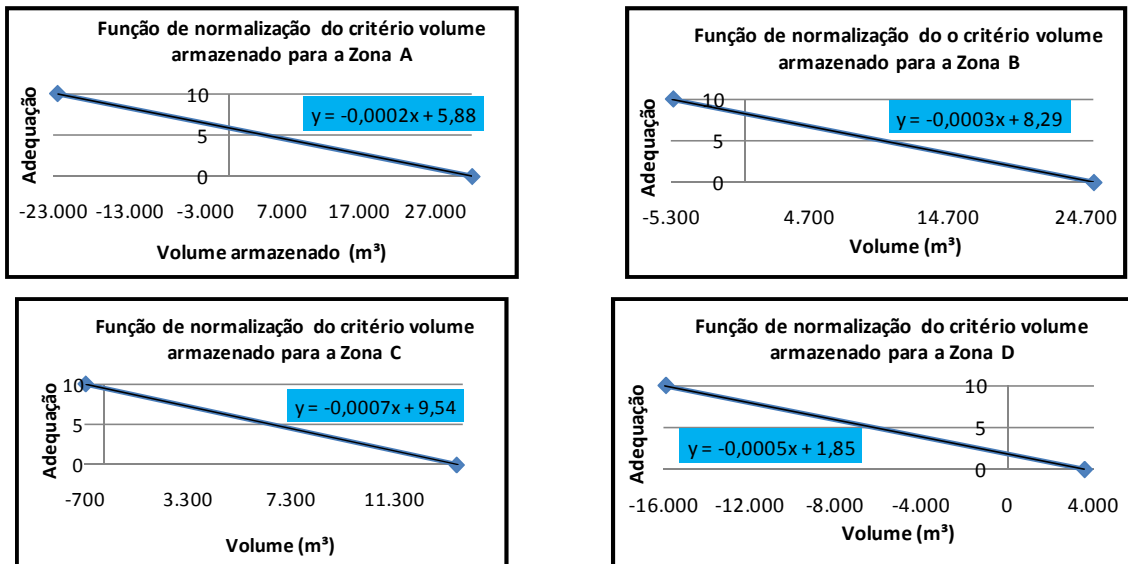


Figura 88: Funções de normalização do critério volume armazenado para as zonas analisadas

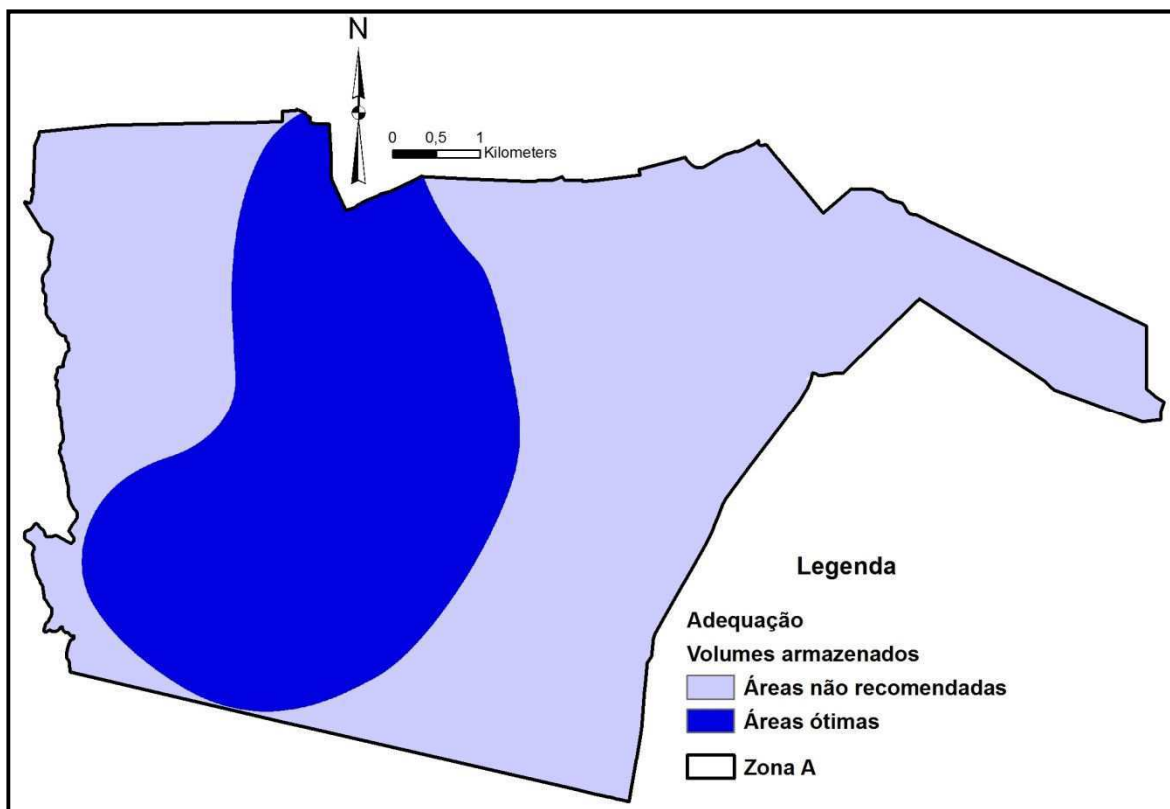


Figura 89: Mapa de volumes armazenados normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona A

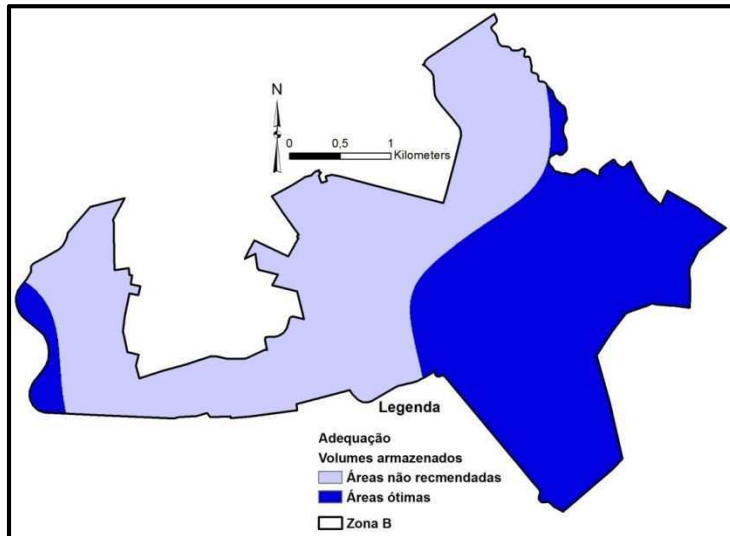


Figura 90: Mapa de volumes armazenados normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona B

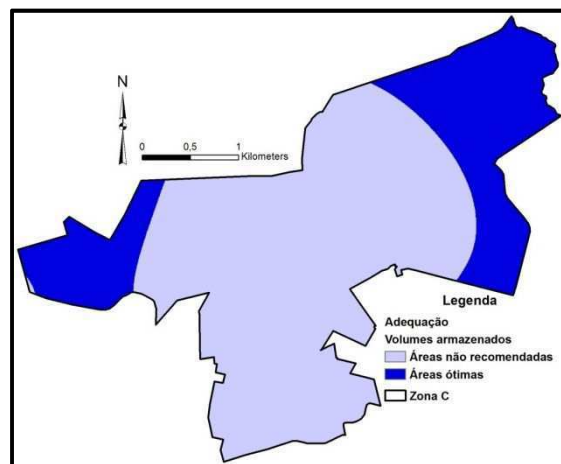


Figura 91: Mapa de volumes armazenados normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona C

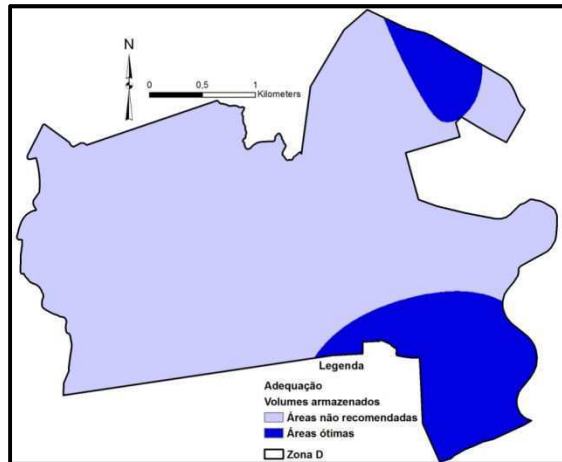


Figura 92: Mapa de volumes armazenados normalizado para o intervalo de 0 a 10 segundo uma função linearmente decrescente e classificado em áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação para a Zona D

A análise multicriterial é realizada considerando o critério restritivo, vazios urbanos. O critério altimetria recebeu maior peso, pois o mesmo é tratado como o de influência em projeto de SUDA. Os demais critérios receberam pesos equivalentes. A operação para a análise multicriterial está representada na Equação 3. Assim como na Alternativa 1, a escolha dos pesos de cada critério foi confirmada após distintos testes.

$$\{[(0,5 \times \text{Altimetria}) + (0,25 \times \text{Distância}) + (0,25 \times \text{Volume armazenado})] \times \text{vazios urbanos}\} \quad (\text{Equação 3})$$

Os resultados da análise da Alternativa 2 foram previstos, a princípio para as áreas em expansão urbana consideradas (região sudoeste da cidade de Campina Grande). No entanto, optou-se em analisar todo o limite urbano através do zoneamento abordado. Estas áreas foram avaliadas no momento em que considerou-se a Zona A, pois as mesmas estão abrigadas, quase totalmente dentro desta zona. Outra zona que possui áreas urbanas em expansão é a Zona D.

Os resultados da otimização de áreas para a localização de unidades de reservação para a Zona A, Zona B, Zona C e Zona D podem ser observados na Figura 93, Figura 94, Figura 95, Figura 96, respectivamente.

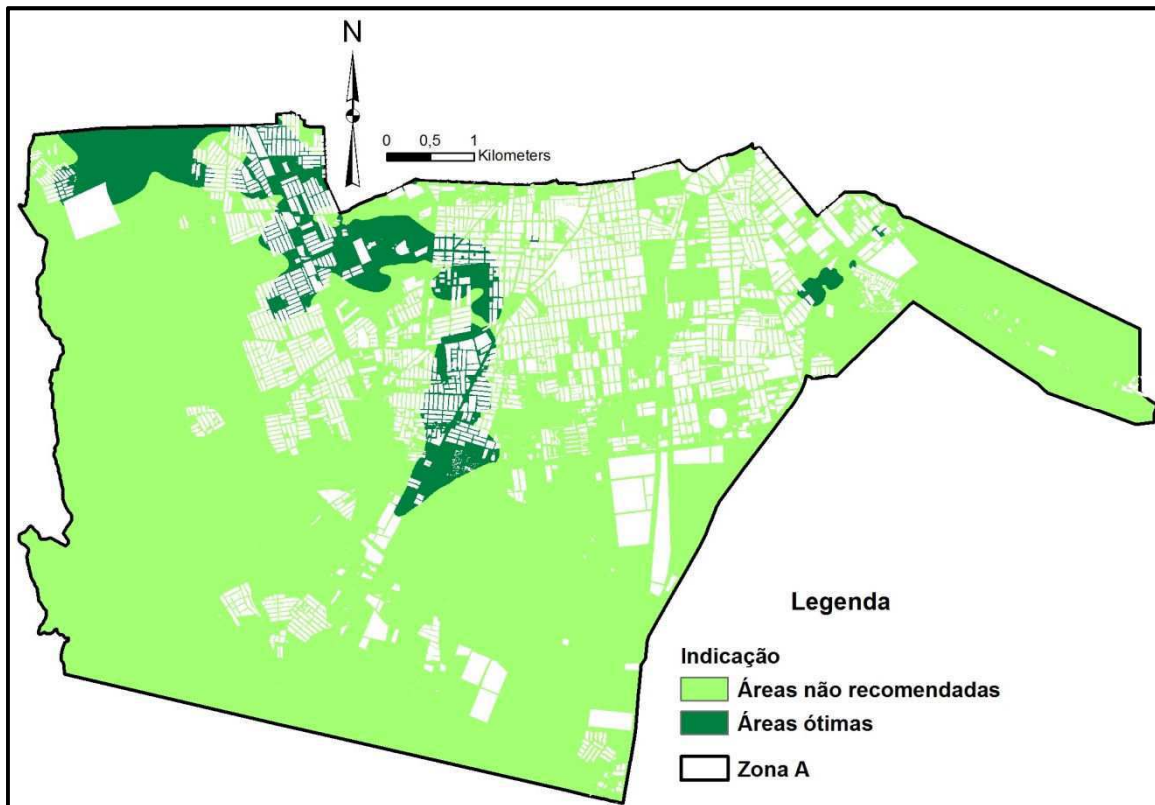


Figura 93: Indicação de áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação na Zona A

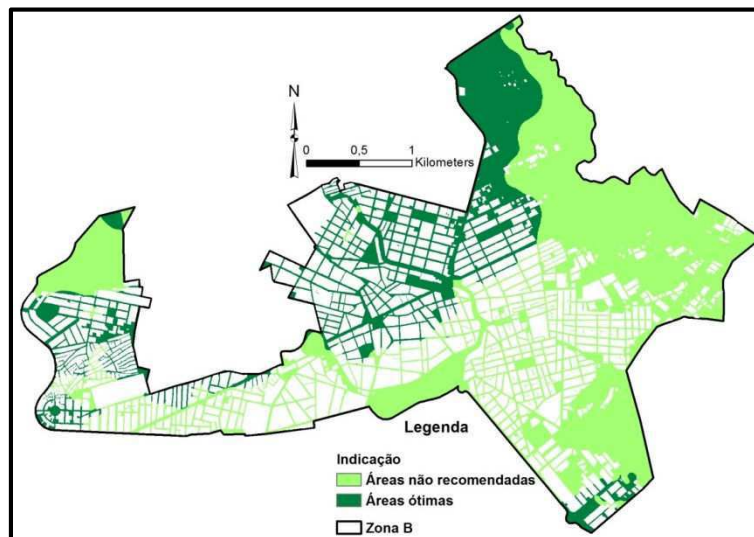


Figura 94: Indicação de áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação na Zona B

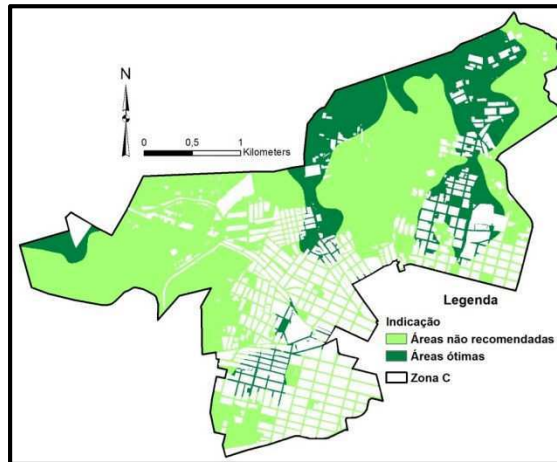


Figura 95: Indicação de áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação na Zona C

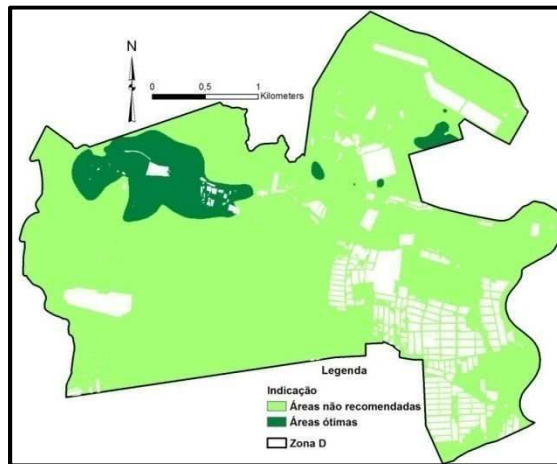


Figura 96: Indicação de áreas para a disposição espacial de novas unidades de reservação na Zona D

Diante dos resultados obtidos, pode-se afirmar que as alternativas analisadas podem ser utilizadas como subsídios técnicos na fase de planejamento de sistemas de distribuição de água. A utilização dos SIG como SADE funciona como um instrumento potencializador no auxílio à tomada de decisão.

Atenta-se às limitações em relação à obtenção de dados, tais como: espacialização de tipologias das demandas de água na mancha urbana, consumos de água pontuais, variação das pressões na rede, entre outras, que por sua vez, restringiram as possibilidades de aprimorar as Alternativas analisadas, além de que ocasionou a impossibilidade de considerar outras Alternativas pertinentes.

Capítulo 6: Considerações finais e sugestões

6.1 Considerações Finais

Diante da problemática relacionada à otimização de ações em Sistemas Urbanos de Distribuição de Água, novas técnicas de trabalho tem sido urgentes para promover um planejamento eficiente para o meio urbano.

O inevitável crescimento da demanda de água provoca uma contínua expansão dos SUDA, exigindo soluções eficazes que possam refletir no seu adequado planejamento. Neste sentido, muitas das decisões necessárias, podem ser auxiliadas por ferramentas potenciais, as quais integram essas novas práticas de planejamento, que possibilitem a indicação das soluções mais acertadas.

Um dos problemas mais destacados que se refere aos serviços de abastecimento de água é a irregularidade que apresenta sua distribuição espacial. Muitas populações que vivem as margens da área urbana ficam sem acesso ao serviço de abastecimento de água adequado.

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) oferecem uma série de vantagens frente à gestão habitual dos serviços de distribuição de água. Na disposição espacial de unidades de reservação, esses sistemas podem gerar resultados mais robustos frente à simples localização destas unidades. Para isso utiliza-se de uma série de critérios, gerando resultados na eficiência de diversos aspectos da rede de distribuição, tais como, otimização de pressões, adequação do atendimento a todos os usuários, minimização de custos, entre outros.

Uma vez que esses sistemas podem servir como um SADE, eles possibilitam a realização de tarefas impossíveis de serem efetuadas de maneira manual. Além disso, a realização destas tarefas pode incrementar de modo notável a eficácia e equidade do atendimento à população a estes serviços. A implantação dos SIG na tarefa de otimizar a localização de equipamentos que constituem os SUDA parece altamente recomendável.

Pode-se dizer que a metodologia utilizada nesta pesquisa possui aspecto inovador e é válida do ponto de vista de que a otimização da disposição espacial de unidades de reservação aperfeiçoa aspectos gerais da rede de distribuição de água, a saber: pressões, equidade de atendimento à demanda, custos, entre outros.

O mapeamento de lotes com riscos a desabastecimento pode funcionar como indicador para ações de gestão e planejamento, visto que sugere que uma parcela dos usuários de água encontra-se em áreas com regime deficiente de abastecimento, seja por questões operacionais, sociais ou geográficas. Observa-se uma superposição de fatores que poderiam explicar os riscos mapeados. Essas áreas podem estar submetidas simultaneamente à baixa qualidade do serviço e a localização em áreas de pequena urbanização.

Os resultados das zonas mais adequadas para a disposição de novas unidades de reservação podem auxiliar na tomada de decisão, trazendo diretrizes de planejamento em função da expansão do sistema estudado. A obtenção dessas diretrizes para o planejamento dos SUDA na área de estudo escolhida, visa minimizar custos, aumentando a eficiência e alcance social do serviço ao término da implementação do sistema proposto.

A disponibilidade de dados é fator determinante para que uma metodologia seja representada de forma mais realística. Desta forma, seriam necessárias outras informações, sobre o SUDA estudado.

A perspectiva de integração de um simulador hidráulico, como o Epanet, ao SIG utilizado também foi limitada por ausência de dados. Tentativas de simulação foram realizadas, mas a carência de algumas informações tornou inviável esta etapa.

Outrossim, um estudo com as características apresentadas torna-se interessante tanto do ponto de vista acadêmico com todas as implicações e vantagens inerentes a um projeto de pesquisa, como por ser este um projeto cujos resultados podem ser utilizados como benefícios para o planejamento do abastecimento de água da cidade de Campina Grande como um todo.

Ressalta-se, entretanto o caráter introdutório deste trabalho em um contexto de utilização desta metodologia no estabelecimento de “indicadores” de risco de desabastecimento, de localizações mais adequadas de unidades de reservação, etc. Na ausência de estudos mais detalhados, estes indicadores já se apresentam como um grande avanço para os projetos de SUDA por permitirem a tomada de decisões baseada em critérios estabelecidos.

Espera-se, portanto, que a visualização espacial das informações da forma como apresentada neste trabalho, já represente por si só, uma grande contribuição para o

setor e possa ser utilizada enquanto metodologia de projeto em qualquer área urbana em que se tenham dados semelhantes disponíveis para análise.

6.2 Sugestões e recomendações

Tendo em vista que a utilização dos SIG em planejamento de sistemas de distribuição de água é indicada como uma das técnicas inovadoras pelos diversos motivos discutidos, muitos estudos poderão ser realizados neste sentido. Assim, são apontadas algumas sugestões e ou recomendações:

- Explorar as possibilidades de integração da metodologia apresentada com resultados advindos de simuladores hidráulicos, tanto em um mesmo ambiente computacional (Simuladores e SIG integrados) quanto em ambientes distintos;
- A partir de uma base de dados mais detalhada, com outros níveis de informação como, por exemplo: uso do solo por lote, estimativa de demanda por lote, etc., utilizar a mesma metodologia de espacialização e análise multicriterial espacial para a obtenção de resultados mais refinados e, portanto, simulações mais realísticas da área estudada;
- Em 2010, com os novos dados censitários disponíveis, realizar novamente a modelagem apresentada e analisar as mudanças dos resultados ao longo de uma década.

Capítulo 7: Referências Bibliográficas

ABNT (1994). Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR N° 12.217: Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público.

BAHADUR, R.; PICKUS, J., AMSTUTZ, D.; SAMUELS, W. (2001). A GIS-based Water Distribution System for Salt Lake City, UT., Proceedings 21st Annual ESRI User Conference, July 9- 13, 2001, San Diego, CA.

BARBBITT, H. E.; DOLAND, J. J.; CLEASBY, J. L. (1962). Abastecimento de água. Edgard Blucher. Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo.

BARCELLOS, C.; COUTINHO, K.; PINA, M. F.; MAGALHÃES, M. M. A. F.; PAOLA, J. C. M. D. SANTOS, S. M. (1998). Inter-relacionamento de dados ambientais e de saúde: análise de risco à saúde aplicada ao abastecimento de água no Rio de Janeiro utilizando Sistemas de Informações Geográficas. Cadernos de Saúde Pública, vol. 14, N° 3, Rio de Janeiro.

BARREDO, J. C.; SENDRA, J. B. (1999). Multicriteria evaluation methods for ordinal data in a GISenvironment. Geographical Systems, n°5, p. 313-327.

BARTOLIN, H.; MARTINEZ, F. (2003). Obtencion de modelos hidraulicos de redes de suministro de água desde SIG. Conexión ArcView-Epanet 2. XXIII Jornadas de IAs AEAS. Salamanca.

BAU, J. (2000). Abastecimento de água e saneamento: uma nova visão e uma nova cultura para serviços essenciais. EPAL-Empresa Portuguesa das Águas Livres, Lisboa.

BONHAM-CARTER, G. F. (1994). Geographic Information Systems for geocientists: modeling with GIS. Delta Printing, Ontario, 398p.

BRAGA, B.; GOBETTI, L. (1997). Análise Multiobjetivo. In: Porto et al. (1997). Técnicas Quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. Ed.Universidade. UFRGS, ABRH, Porto Alegre.

BRASIL (1979). Lei nº 6.766, de 19 de Dezembro de 1979. Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras providências.

BRASIL (2007). Lei Nº 11.445, de 5 de Janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e dá outras providências.

BRIGGS, D. J. (1992). Mapping Environmental Exposure. In: Geographical and Environmental Epidemiology: Methods for Small-Area Studies (P. Elliot, J. Cuzick, D. English & R. Stern, eds.), pp. 158-176, Tokyo: Oxford University Press.

BRITTO, D. A. ORIÁ, V. B. B. (2000). A utilização das ferramentas de geoprocessamento na Embasa. Bahia Análise & Dados, v.10 n.2, 43-46p.

BURROUGH, P. A. (1986). Principles of Geographic Information Systems for Land Assessment, Oxford University Press, New York.

BURROUGH, P. A. (1995). Spatial data quality and error analysis issues: GIS functions and environment modeling. In: Gis and environmental modeling: progress and research issues. GIS World Inc, Fort Collins.

BUZETI, C.; CASAGRANDE, A. P.; BAGGIO, M. A. (2000). Rede de distribuição de água: porquê não a operamos? Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, CD-Rom.

CÂMARA, G., MOREIRA, F. R., BARBOSA, C., ALMEIDA FILHO, R., BÖNISCH, S. (2002). Técnicas de Inferência Geográfica. In: Introdução à Ciência da Geoinformação. Livro on-line, Divisão de Processamento de imagens do INPE, São José dos Campos. Disponível em: <http://www.dpi.inpc.br/giiberto/livro/introd/cap9-inferencia.pdf>.

CANO, J. I. B.; SENDRA, J. B. (1999). Multicriteria evaluation methods for ordinal data in a GIS environment. *Geographical Systems*, nº 5, 313-327p.

CARRIJO, I. B. (2004). Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multiobjetivo e aprendizado de máquina. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 216p.

CARRIJO, I. B.; REIS, L. F. R. (2005). Obtenção de estratégias operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água utilizando algoritmos evolucionários, aprendizado de máquina e ordem de preferência. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa. Cd-Rom, 15p.

CARVALHO, M. J. F; SCOCUGLIA, J. B. (2008). Novos discursos, velhos problemas: políticas urbanas e planejamento em Campina Grande-PB (1970-2005). *Alpharrabios – Revista do Curso de História. Revista Eletrônica Publicada pela EDUEP-UEPB*, v 2, nº1.

CASTRO, M. A. H (2004). Uso conjunto do AutoCad e do EPANET para projeto, simulação e dimensionamento de redes de abastecimento de água. *Anais do VII Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água - SEREA*, João Pessoa. Cd-Rom.

CURTIN, K. M.; CHURCH, R. L. (2006). A family of location models for multiple- type discrete dispersion. *Geographical Analysis*, v. 38, 248–270p.

DEMERS, M. N. (2003). *Fundamentals of Geographic Information Systems*. John Wiley & Sons. Second Edition. 636p.

DEVERTEUIL G. (2000). Reconsidering the legacy of urban public facility location theory in human geography. *Progress in Human Geography*. v 24, 47–69p.

DIAS, L. F. S. (2006). Estudo da localização otimizada de equipamentos para detecção de contaminação em redes de distribuição de água. Dissertação de Mestrado. USP. São Carlos. 144p.

EASTMAN, J. R. (1999). Multi-criteria evaluation and GIS. In: LONGLEY, P.A et al (Ed. Geographical Information Systems- Principles and Technical Issues. John Wiley & Sons. v. 1, New York.

EASTMAN, J. R. (2003). IDRISI Kilimanjaro: Guide to GIS and Image Processing. Clark University. Idrisi Production. Manual Version 14.0. Environmental Protection Agency.

ESRI (2006). Environmental Systems Research Institute. Tutorial do ArcGIS 9.2.

FELGUEIRAS, C. A. (2001). Modelagem numérica de terreno. Ministério da Ciência e Tecnologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE-8081-PRE/3896, São José dos Campos.

FERNANDES, C. (2008). Reservatórios de água. In: Abastecimento de água. Disponível em <<http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento>.

FORMIGA, K. T. M.; CHAUDHRY, F. H.(2008). Modelos de análise hidráulica de redes de distribuição de água considerando demanda dirigida pela pressão e vazamentos. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental (RESA). v 13; nº 2; 153-162p.

GAMEIRO, R. C. P. G.; SOUZA, R. S.; POLIZER, M.; STEFFEN, J. L.; (2005). Dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água com a utilização de algoritmos genéticos. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. Cd-Rom.

GOES FILHO A., (1998). Interface gráfica para dimensionamento e otimização de fluxos em redes de abastecimento d' água. Universidade Federal do Ceará. Dissertação de Mestrado. 167p.

GOMES, H. P. (2004). Sistemas de Abastecimento de água: dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórios. 2ª Edição. Editora Universitária – UFPB, João Pessoa.

GREEN, K.; (1999). Development of the spatial domain in resource management. In: STAIN, M. (1996). GIS solution in natural resource management: balancing the technical-political equation. Word Press. Santa Fe.

HEYWOOD, D. I.; CORNELIUS S. C., (1998). Developing a virtual campus for UNIGIS: an international distance learning programme in GIS. Habitat. v. 5, 27-29p.

HSU, N. S.; CHENG, W. C.; CHENG, W. M.; WEI, C. C.; YEH, W. W. G. (2008). Optimization and capacity expansion of a water distribution system. Advances in Water Resources. DOI: 10.1016.

IBGE (2000). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. *Setores censitários de 2000*. Disponível em : <www.ibge.gov.br>.

IBGE (2008). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. *Contagem da população para o ano de 2008*. Disponível em : <www.ibge.gov.br>

LONGLEY, P. (2005). Geographical Information Systems: a renaissance of geodemographics for public service delivery. Progress in Human Geography. v. 29, nº 1, 57-63p.

LOPES, L. H A. (2003). Modelo de gestão urbana baseado na capacidade de atendimento do sistema de abastecimento de água. Universidade Federal de Santa Catarina. Tese de Doutorado. Florianópolis. 156p.

LOPES, L. H. A.; LOCH, C.; BÄHR, H.P. (2004). Modelo de gestão urbana baseado na capacidade de atendimento do sistema de abastecimento de água. Anais do Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Florianópolis, UFSC. Cd-Rom.

MALCZEWSKI, J. (1996). A GIS-based approach to multiple criteria group decision-making. *Int. J. Geographical Information Systems*. v. 10, nº 8, 955-971p.

MIQUEL, V. S. F; PATIÑO G. L. (2002). Regulación de redes de distribución de agua In: *Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua*. Grupo de mecánica dos fluidos. Universidad Politécnica de Valencia. 1ª Edição. 257 p.

ONO, S. (2008). Sistema de suporte à decisão para gestão de água urbana – URBSSD. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 148p.

RIGHETTO, A. M. (2002). Operação ótima de sistema urbano de distribuição de água. In: *Seminário de planejamento, projeto e operação de redes de abastecimento de água: o estado da arte e questões avançadas*. João Pessoa. 16p. CD-Rom.

ROSSMAN; L. A. (2000). *EPANET User's Manual*. National risk management research laboratory, office of research and development, USEPA, EPA Publication. EPA/600/R-00/057, September. 200p.

RUFINO, I. A. A.; (2004). *Gestão de Recursos Hídricos em ambientes urbanos costeiros: modelagem e representação do conhecimento em Sistemas de Informação Geográfica*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 166p.

SENDRA, J. B. (1997). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid. 2ª Edição, RIALPE, 451p.

SENDRA, J. B. JIMÉNEZ, A. M. (2007). Localización-asignación y justicia/equidad espacial con Sistemas de información geográfica. XI Conferencia Iberoamericana de SIG, Departamento de Ciencias Sociales, Universidad de Lujan, 95- 115p. ISBN: 978-9285-33-6, Lujan. Disponível em: <<http://www.geogra.uah.es>>.

SENDRA, J. B. PALM, F, GÓMEZ, M. D. (2007). LOCALIZA: una herramienta SIG para resolver problemas de localización óptima. I Jornadas de SIG libre, Girona. Disponível em <<http://www.sigte.udg.es/jornadassiglibre2007/comun>>.

SENDRA, J. B.; DELGADO, M. G.; JIMÉNEZ, A. M.; POZZO, F. (2001). *Hacia un sistema de ayuda a la decisión espacial para la localización de equipamientos. Geonatura: Sistemas de Información Geográfica aplicados a las Ciencias ambientales y de la Salud*. Publicaciones CD, 20p. ISBN: 1-881722-59-7. San Juan de Puerto Rico. Disponível em: <<http://www.geogra.uah.es>>.

SILVA, F. C.; DIAS, I. C. S.; SILVA, J. S.; NÓBREGA, A. F. 2004. Panorama de perdas em sistemas de abastecimento. Anais do VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. São Luís-MA. Anais CD-ROM.

SIMÃO, A. C. R.; RODRIGUES, J. M. C. (2003). Um SI protótipo para apoio à gestão de sistemas urbanos de abastecimento de água. Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra – INESC, ISSN: 1645-2631, Coimbra.

SOLANO, F. J. M. (2002). *Aplicación de los sistemas de información geográfica la gestión técnica de redes de distribución de agua potable*. Tesis Doctorado. Universidad Politecnica de Valencia. Valencia. ISBN: 84-688-0374-X. CD-Rom. 350p.

SOLANO, F. J. M.; SEBÁSTIAN J. I. (2002). *Aplicación de los SIG em el modelado y proyecto de redes*. In: Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua. Grupo de mecânica dos fluidos (GMF). Universidad Politécnica de Valencia. 1ª Edição. 257p.

SOLANO, F. J. M; GARCÍA, R. P.; REY, P. L. I. (2002). Water mains creation using GIS. Agile Conference. Palma de Mallorca. 547-556p.

SOLER, E. M. (2008). Otimização dos custos de energia elétrica na programação do armazenamento e distribuição de água em redes urbana. Dissertação do Mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos. 158p.

SOUZA, R. S.; GAMEIRO, R. C. P. G.; POLIZER, M.; STEFFEN, J. L. (2005). Dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água: estudo de caso. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa-PB. CD ROM.

TIBÚRCIO, E. C. (2006). Desenvolvimento de uma interface em SIG para suporte ao dimensionamento hidráulico de sistemas de abastecimento de água. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 206p.

TSUTIYA, M. T. (2001). Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, v. 1, 185p.

ZADEH L. A. (1965). Fuzzy sets. Information and Control, v. 8, 338-353p.