



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

**MARÍLIA SILVA DANTAS ROCHA**

**IMPACTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM CISTERNAS RURAIS DO**  
**NORDESTE BRASILEIRO**

**CAMPINA GRANDE**  
**FEVEREIRO DE 2013**

**MARÍLIA SILVA DANTAS ROCHA**

**IMPACTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM CISTERNAS RURAIS DO  
NORDESTE BRASILEIRO**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre.**

**Área de Concentração: Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária**

**Orientadores: Dr. Carlos de Oliveira Galvão**

**Dr. Camilo Allyson Simões de Farias**

**Campina Grande, fevereiro de 2013.**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

R672i Rocha-Dantas, Marília Silva.  
Impacto de mudanças climáticas em cisternas rurais do nordeste brasileiro. -- Campina Grande, 2013.  
56 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2013.

"Orientação: Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão, Prof. Dr. Camilo Allyson Simões de Farias".

Referências.

1. Captação de Água de Chuva - Cisternas. 2. Mudanças Climáticas. 3. Semiárido. 4. Impactos na Precipitação. I. Galvão, Carlos de Oliveira. II. Farias, Camilo Alysson Simões de. III. Título.

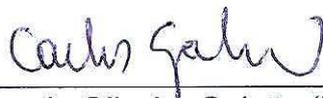
CDU 628.1.03(043)

MARÍLIA SILVA DANTAS ROCHA

**IMPACTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM CISTERNAS RURAIS DO  
NORDESTE BRASILEIRO**

Dissertação aprovada em 26 de fevereiro de 2013.

COMISSÃO EXAMINADORA:



---

Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão (UFCG)

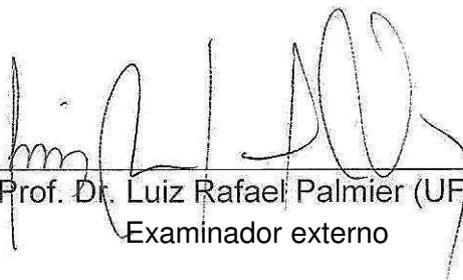
Orientador



---

Prof. Dr. Camilo Allyson Simões de Farias

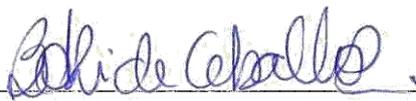
Coorientador



---

Prof. Dr. Luiz Rafael Palmier (UFMG)

Examinador externo



---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Beatriz Susana Ovruski de Ceballos (UEPB)

Examinadora interna

CAMPINA GRANDE  
FEVEREIRO DE 2013

À **Marciano e Maria José**, amados pais,

*Dedico.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por sua fidelidade e benignidade presentes durante cada dia de minha vida, pelas conquistas que tem me proporcionado e pelos momentos de dificuldades em que me proporcionou superação e aprendizado.

Aos meus amados e preciosos pais, Marciano e Maria José pela dedicação, pelo investimento e pelo amor incondicional.

À minha família, em especial ao meu irmão, Marcílio, pelo carinho, amizade e ajuda sempre disponível.

À Leonardo, meu amado esposo, pelo companheirismo, incentivo, amor e sorrisos diários.

Ao meu orientador e “pai acadêmico”, Prof. Carlos de Oliveira Galvão por todas as oportunidades, experiências, formação, incentivo, dedicação, confiança e amizade nestes quase 10 anos de orientação.

À Professora Beatriz Ceballos pela importante experiência de pesquisa no Projeto Cisternas, que tanto colaborou para este trabalho, pela amizade e ternura.

Ao Professor Luiz Rafael Palmier, pela disponibilidade em fazer parte da banca examinadora deste trabalho, e por suas importantes contribuições a este.

À Rodolfo, meu amigo-irmão, por ser um ajudador sempre presente. Pelos incentivos e pelo compartilhar de tantos momentos e experiências.

Aos que fizeram e ou fazem o laboratório de Hidráulica II Manoel Gilberto de Barros, por se tornarem amigos e colaboradores na minha formação, em especial a

Ester, Itamara, John, Zezineto, Mônica, Kennedy, Talita, Anderson e Silvio.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental: Carlos Galvão, Iana Rufino, Márcia Rios, Eduardo Figueiredo, Zédna Vieira, Camilo Farias, Annemarie König e Rosires Curi, por compartilharem o conhecimento técnico e científico com zelo e empenho.

Em especial ao Professor Camilo Farias pela contribuição no desenvolvimento do modelo computacional necessário à pesquisa; e à Professora Iana Rufino pelo auxílio na espacialização dos dados e resultados deste trabalho.

Aos colegas de mestrado, em especial aos amigos Vanessa, Viviane, Caio, Marcelo e David, pelo companheirismo que tornou esta caminhada mais leve e exitosa.

À Josete, pela atenção e presteza.

Aos funcionários da Área de Engenharia de Recursos Hídricos: Valdomiro, Vera, Ismael, Haroldo, Raul e Aurezinha, pelo suporte administrativo e técnico.

Ao INCT-Clima e aos Projetos Cisternas, SegHidro e CISA pela contribuição científica a este trabalho.

À Universidade Federal de Campina Grande pela oportunidade de formação acadêmica e profissional.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão de bolsa de Mestrado, e à ATECEL, ao FINEP e ao MCT, pelo suporte financeiro e administrativo.

## RESUMO

---

O semiárido brasileiro compreende uma área de grande extensão e é caracterizado por uma grande variabilidade climática que, associada ao alto índice de evaporação e baixa capacidade de retenção de água no solo, provocam eventos de escassez hídrica. Como alternativa de garantir maior suprimento de água à população semiárida, os sistemas de captação de água de chuva (SCAC) têm se expandido por toda a região. Hoje, mais de 400.000 famílias são usuárias desses sistemas (cisternas) e esse número deve chegar a um milhão nos próximos anos, com a continuação do Programa 1 Milhão de Cisternas (P1MC). Assim, existe uma grande necessidade de monitorar e simular o comportamento desses sistemas, a fim de conhecer as possíveis transformações prospectivas, e assim auxiliar na tomada de decisões por parte de órgãos federais, estaduais e municipais, na tentativa de prever se haverá precipitação suficiente nos anos seguintes para suprir a demanda dessas famílias. Os SCAC são altamente vulneráveis às mudanças climáticas, principalmente no tocante à precipitação; dessa forma, é importante estimar esses possíveis impactos. Através de séries históricas de precipitação e das projeções climáticas futuras fornecidas por diversos modelos de circulação global é possível criar cenários de mudanças climáticas e, ao submetê-los a um sistema de balanço hídrico de reservatório, obter a vulnerabilidade desses sistemas às possíveis mudanças no clima futuro. Neste trabalho observou-se que a vulnerabilidade atual dos SCAC já é significativa e que as mudanças climáticas podem provocar impactos relevantes. Entretanto, medidas adaptativas dos SCAC, por exemplo, podem mitigar significativamente esses impactos.

Palavras chave: mudanças climáticas, semiárido, cisternas, impactos.

## ABSTRACT

---

The Brazilian semiarid region comprises an area of great extent and is characterized by a large climate variability associated with the high rate of evaporation and low water holding capacity of the soil, causing water scarcity events. As an alternative to increasing the water supply to the population semiarid, systems for capturing rainwater (SCAC) have expanded throughout the region. Today, over 400,000 households are users of these systems (tanks) and that number is expected to reach one million in the coming years, with continued Schedule 1 Million Cisterns (P1MC). Thus, there is a great need to monitor and simulate the behavior of these systems in order to know the possible transformations-looking, and so assist in decision making on the part of federal, state and municipal governments in an attempt to predict whether there will be enough rainfall in years to meet the demand of these families. The SCAC are highly vulnerable to climate change, especially regarding precipitation, thus it is important to estimate these potential impacts. Through time series of rainfall and future climate projections provided by various global circulation models is possible to create scenarios of climate change and to submit them to a system of reservoir water balance, obtain the vulnerability of these systems to potential changes in climate future. In this study it was observed that the current vulnerability of the SCAC is already significant and that climate change could cause significant impacts. However, adaptive measures the SCAC, for example, can significantly mitigate these impacts.

Keywords: climate change, semiarid, tanks, impacts.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

---

Figura 1 Delimitação do Semiárido Brasileiro. ....	17
Figura 2 Estrutura conceitual 3D de um Modelo de Circulação Global. ....	21
Figura 3 Ilustração das famílias de cenários de emissão de efeito estufa. ....	22
Figura 4 Localização da área de estudo e dos pontos selecionados. ....	30
Figura 5 Municípios de Alagoa Nova (Brejo/Agreste), Sumé (Cariri) e Piancó (Sertão). ....	31
Figura 6 Esquema gráfico do fluxo de cálculos da vulnerabilidade dos SCAC. ....	35
Figura 7 Fluxograma da metodologia aplicada. ....	36
Figura 8 Anomalias médias mensais de precipitação para 2050, para os 19 modelos climáticos. ....	39
Figura 9 Anomalias médias mensais de precipitação para 2100, para os 19 modelos climáticos. ....	40
Figura 10 Precipitações médias mensais históricas e futuras (2050) com anomalias máximas, médias e mínimas. ....	41
Figura 11 Precipitações médias mensais históricas e futuras (2100) com anomalias máximas, médias e mínimas. ....	42
Figura 12 Vulnerabilidade para o clima atual (1961-1990). ....	43
Figura 13 Espacialização da vulnerabilidade para o clima atual (1961-1990). ....	43
Figura 14 Vulnerabilidades máximas, mínimas, medianas e quartis de 25% e 75%, para 2050, SRA1B. ....	44
Figura 15 Vulnerabilidades máximas, mínimas, medianas e quartis de 25% e 75%, para 2100, SRA1B. ....	45
Figura 16 Vulnerabilidades futuras para 2050, para área de captação de 60m <sup>2</sup> . ....	47

Figura 17 Comparação das vulnerabilidades para clima atual e (2050) para áreas de captação de 40m <sup>2</sup> com vulnerabilidades futuras (2050) para área de captação de 60m <sup>2</sup> .....	48
Figura 18 Vulnerabilidades futuras para 2100, para área de captação de 60m <sup>2</sup> .....	49
Figura 19 Comparação das vulnerabilidades para clima atual e futuro (2100) para áreas de captação de 40m <sup>2</sup> com vulnerabilidades futuras (2100) para área de captação de 60m <sup>2</sup> . ....	50
Figura 20 Comparação das vulnerabilidades para clima atual para áreas de captação de 40m <sup>2</sup> com vulnerabilidades futuras (2050 e 2100) para área de captação de 60m <sup>2</sup> . ....	51
Figura 21 Cenários de vulnerabilidade (déficit hídrico) das cisternas considerando aumento na área de captação. ....	52

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1 Variáveis climáticas com prognósticos disponibilizados pelo IPCC. ....	19
Tabela 2 Modelos de Circulação Global com resultados disponibilizados pelo IPCC. ....	20
Tabela 3 Vulnerabilidades atual e futuras para área de captação de 40 m <sup>2</sup> . Os valores se referem às médias, para cada descritor, no conjunto de 52 pontos na área de estudo. ....	46
Tabela 4 Vulnerabilidades atuais e futuras (2050) para os SCAC com características do P1MC. ....	46
Tabela 5 Variação nas vulnerabilidades atual e futura, para áreas de captação de 40m <sup>2</sup> e 60m <sup>2</sup> . Os valores se referem às médias, para cada descritor, no conjunto de 52 pontos na área de estudo. ....	49

## SUMÁRIO

---

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS .....	16
2.1. Objetivo Geral .....	16
2.2. Objetivos Específicos.....	16
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	17
3.1. O Semiárido Brasileiro .....	17
3.2. Captação de Água de Chuva no Semiárido Rural Brasileiro.....	18
3.3. As Mudanças Climáticas.....	19
3.4. Captação de Água de Chuva x Mudanças Climáticas .....	26
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	30
4.1. Área de Estudo .....	30
4.2. Formação do Banco de Dados .....	31
4.3. Modelo de Balanço Hídrico .....	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
5.1. Cenários de Impactos na Precipitação.....	38
5.2. Cenários de Impactos nos SCACs.....	43
5.3. Cenários de Adaptação.....	47
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55

### 1. INTRODUÇÃO

Os quase um milhão de quilômetros quadrados do Semiárido Brasileiro (BRASIL, 2005) são caracterizados por grande irregularidade pluviométrica (espacial e temporal), altos índices de evapotranspiração e baixa capacidade de retenção de água no solo. A sazonalidade da chuva, nessa região, compreende um período de 4 meses e seus totais pluviométricos anuais variam entre 300 e 1000 mm (JACOMINE, 1996; BRITO *et al.*, 2007).

A captação e armazenamento de água de chuva em cisternas, amplamente difundidos na região pelo Programa 1 Milhão de Cisternas, coordenado pela Articulação do Semiárido Brasileiro (ASA), que propõe a construção de 1 milhão de cisternas no Semiárido Brasileiro, é uma das estratégias adotadas para a mitigação dos danos causados pela variabilidade climática da região.

Esse programa, até o início do ano de 2013, beneficiou cerca de dois milhões de brasileiros e, diante da ampla dimensão desse sistema de abastecimento de água, seu monitoramento e simulação de seu comportamento são valiosos na tomada de decisão por órgãos federais, estaduais e municipais, na tentativa de prever se os meses ou anos seguintes terão precipitação suficiente para atender à demanda dos usuários. Além das incertezas provocadas pelo regime climático da região e pelas particularidades de cada SCAC, os impactos das mudanças climáticas sobre esses sistemas surgem como um agravante na vulnerabilidade socioambiental da região, em especial por saber-se que esse tipo de sistema é altamente vulnerável às mudanças climáticas, principalmente às mudanças na precipitação.

Para avaliar os impactos das mudanças climáticas, faz-se uma comparação entre dois cenários climáticos diferentes: um de referência (que seja estatisticamente semelhante à situação histórica) e outro que estima o clima futuro por meio de Modelos de Circulação Global (MCGs). No caso da utilização dos MCGs, as projeções são geradas pelo acoplamento da atmosfera com os oceanos, forçados com o aumento da concentração de gases de efeito estufa, medidos no século XX e projetados para o futuro, conforme o Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (IPCC, 2001). Este relatório define quatro diferentes conjuntos de cenários (A1, A2, B1 e B2) que descrevem o possível desenvolvimento social, econômico e político em todo o planeta, levando em consideração especialmente a emissão de gases de efeito estufa.

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC – divulgou e disponibilizou relatórios de mudanças no clima e cenários para nove variáveis climáticas, projetadas por vários modelos dos principais centros de modelagem do clima no mundo (IPCC-TGICA, 2007). As anomalias climáticas de precipitação prognosticadas pelos MCGs adicionadas às séries históricas de precipitação geram séries sintéticas de precipitação que representam um clima futuro. Estas séries simuladas em um modelo de balanço hídrico simples, que representa o comportamento de um sistema de captação de água de chuva, resultam na garantia hídrica futura para aquele sistema (GALVÃO *et al.*, 2011).

Com os resultados obtidos com as simulações feitas com séries que representem o clima atual e com as que representem o clima futuro é possível fazer uma comparação e estimar os impactos sobre esses sistemas.

## **2. OBJETIVOS**

### ***2.1. Objetivo Geral***

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a vulnerabilidade dos Sistemas de Captação de Água de Chuva, situados em zonas rurais, do Nordeste Brasileiro às mudanças climáticas.

### ***2.2. Objetivos Específicos***

- Obter cenários de Mudanças Climáticas, em específico mudanças na precipitação, para o Nordeste Brasileiro, considerando os cenários de emissões do 4º relatório do IPCC;
- Simular cenários de vulnerabilidades atual e futuras das cisternas rurais do Nordeste, com características definidas pelo P1MC;
- Avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre a vulnerabilidade dos SCAC do Nordeste Brasileiro;
- Avaliar medidas de adaptação mitigadora das vulnerabilidades hídricas dos SCAC da área de estudo.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. O Semiárido Brasileiro

Segundo o Ministério da Integração Nacional (BRASIL, 2005), a área da região semiárida brasileira foi re-delimitada e expandida de 892.309,4 km<sup>2</sup> para 969.589,4 km<sup>2</sup>, contendo 1.132 municípios em dez Estados da Federação (PI, CE, RN, PB, PE, AL, SE, BA e MG) (Figura 2.1), baseando-se em três critérios técnicos:

- precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 mm;
- índice de aridez de até 0,5 calculado pelo balanço hídrico, que relaciona as precipitações e a evapotranspiração potencial, no período entre 1961 e 1990;
- risco de seca maior que 60% tomando-se por base o período entre 1970 e 1990.



Figura 1 Delimitação do Semiárido Brasileiro.

Fonte: BRASIL (2005).

Nobre e Melo (2011) explicam que mesmo um ano no qual os totais pluviométricos sobre uma região tenham sido, por exemplo, em torno da média climatológica pode, mesmo assim, representar um ano com severas restrições, se durante o período chuvoso como um todo ocorreram um ou mais períodos prolongados de estiagem. Desta forma, em eventos de seca (ou cheias) a variabilidade intra-sazonal é tão agente quanto o total pluviométrico. Em paralelo, existem ainda as variabilidades espacial, temporal, interanual e plurianual que impõem secas e cheias severas, algumas vezes consecutivas.

O Semiárido Brasileiro, pelas suas características climáticas e hidrológicas, é uma das áreas potenciais às mudanças no clima (MARENGO, 2007). Impactos negativos, que diminuam, a precipitação podem aumentar a sua vulnerabilidade hídrica, particularmente da captação da água da chuva e seu armazenamento em cisternas, uma importante fonte de abastecimento de água para consumo humano (BRITO *et al.*, 2007).

### **3.2. Captação de Água de Chuva no Semiárido Rural Brasileiro**

O uso de cisternas para captação e armazenamento de água de chuva durante a estação chuvosa é uma prática antiga no semiárido rural nordestino (NÓBREGA, 2011). Esta técnica tem sido empregada como forma de mitigar os efeitos do constante déficit hídrico na região (PALMIER e GNADLINGER, 2005; BRITO *et al.*, 2007), causado pela má distribuição espacial e temporal da precipitação, pelos altos índices de evapotranspiração e pela baixa capacidade de retenção de água no solo.

Esta alternativa de abastecimento à população rural difusa do semiárido foi amplamente difundida através do Programa 1 Milhão de Cisternas (P1MC), que em

2003 propôs a construção de 1 milhão de cisternas de placas para armazenamento de água de chuva na região.

O P1MC é coordenado pela Articulação do Semiárido Brasileiro (ASA) em parceria com o Governo Federal (Ministério de Desenvolvimento Social), através do Programa de Segurança Alimentar e Nutricional do Governo Federal. O programa já contemplou mais de 400.000 famílias com cisternas que podem oferecer água para o consumo doméstico direto (beber, cozinhar e escovar os dentes), de uma família de até cinco pessoas, por um ano (ASA, 2003; ASA, 2012). As cisternas construídas pelo P1MC seguem o seguinte padrão: capacidade volumétrica de 16 m<sup>3</sup>, área de captação mínima de 40 m<sup>2</sup> e demanda diária *per capita* de 13,5 l (ASA, 2003).

### **3.3. As Mudanças Climáticas**

O Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) foi criado pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) com o objetivo de prover conhecimento científico sobre as mudanças climáticas. Para o IPCC as mudanças climáticas são definidas como mudanças no clima durante um período de tempo, provocadas por ação antrópica, pela variação natural do meio ambiente ou pelos dois (IPCC, 2007).

O IPCC disponibilizou relatórios de mudanças no clima e cenários para nove variáveis climáticas, projetadas pelos MCGs dos principais centros de modelagem do clima no mundo (IPCC-TGICA, 2007) (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1 Variáveis climáticas com prognósticos disponibilizados pelo IPCC.

<b>Variável</b>	<b>Nome Convencionado</b>	<b>Prefixo</b>	<b>Unid.</b>
Pressão média na superfície do mar	air_pressure_ate_sea_level	Psl	Pa
Precipitação	precipitation_flux	Pr	Mm
Temperatura mínima no ar (a 2 m)	air temperature daily min	tasmin	°C

Variável	Nome Convencionado	Prefixo	Unid.
Temperatura máxima no ar (a 2 m)	air temperature daily max	tasmax	
Temperatura média no ar (a 2 m)	air temperature	tas	
Componente do vento na direção leste (a 10m)	eastward_wind	uas	m s <sup>-1</sup>
Componente do vento na direção norte (a 10m)	northward_wind	vas	m s <sup>-1</sup>
Umidade específica	specific_humidity	huss	-
-	net upward shortwave flux in air	rsds	W m <sup>-2</sup>

Tabela 2 Modelos de Circulação Global com resultados disponibilizados pelo IPCC.

Modelo	Grupo de Modelagem
BCCM1	BCC-CM1, Beijing Climate Centre, China
BCM2	BCCR-BCM2.0, Bjerknes Centre for Climate Research, Norway
CGMR	CGCM3.1(T47), Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis, Canada
CGHR	CGCM3.1(T63), Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis, Canada
CNCM3	CNRM-CM3, Météo-France, France
CSMK3	CSIRO-Mk3.0, CSIRO Atmospheric Research, Australia
ECHOG	ECHO-G, Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of KMA and Model and Data group Germany/Korea
FGOALS	FGOALS-g1.0, LASG / Institute of Atmospheric Physics, China
GFCM20	GFDL-CM2.0, US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
GFCM21	GFDL-CM2.1, US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
GIAOM	GISS-AOM, NASA / Goddard Institute for Space Shuttles, USA
GIEH	GISS-EH, NASA / Goddard Institute for Space Shuttles, USA
GIER	GISS-ER, NASA / Goddard Institute for Space Shuttles, USA
HadCM3	UKMO-HadCM3, Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office, UK
HADGEM	UKMO-HadGEM1, Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office, UK
INCM3	INM-CM3.0, Institute for Numerical Mathematics, Russia
IPCM4	IPSL-CM4, Institut Pierre Simon Laplace, France

<b>Modelo</b>	<b>Grupo de Modelagem</b>
MIHR	MIROC3.2(hires), Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC), Japan
MIMR	MIROC3.2(medres), Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC), Japan
MPEH5	ECHAM5/MPI-OM, Max Planck Institute for Meteorology, Germany
MRCGCM	MRI-CGCM2.3.2, Meteorological Research Institute, Japan
NCCCSM	CSM3, National Center for Atmospheric Research, USA
NCPCM	PCM, National Center for Atmospheric Research, USA

O clima futuro é previsto pelos MCGs através da utilização de uma grade tridimensional, com resolução longitudinal de 250 a 600 km, com 10 a 20 camadas verticais (atmosfera) e até 30 camadas nos oceanos (Figura 2) (IPCC-TGICA, 2007). Seus resultados são obtidos por meio de algoritmos matemático-computacionais que simulam o comportamento do sistema atmosfera-oceano-solo e os intercâmbios de energia entre os subsistemas, forçados com o aumento da concentração de gases de efeito estufa, medidos no século XX e projetados para o futuro, obtendo, assim, cenários prospectivos para as variáveis climáticas, conforme o Relatório Especial sobre Cenários de Emissões, que foi publicado em 2001 (IPCC, 2001).

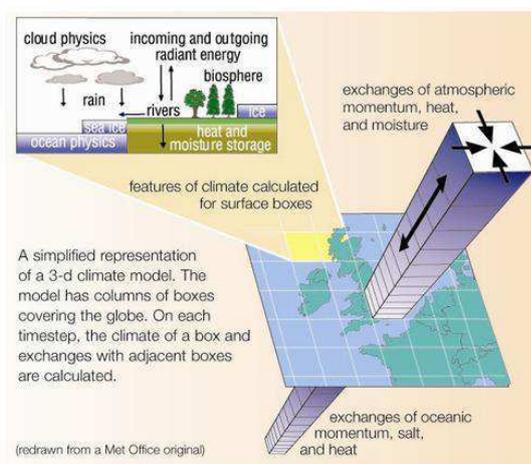


Figura 2 Estrutura conceitual 3D de um Modelo de Circulação Global.  
Fonte: IPCC (2012)

No Quarto Relatório de Avaliação (Fourth Assessment Report – AR4), são definidas quatro famílias de cenários de emissão de gases de efeito estufa (A1, A2, B1 e B2) (Figura 3) que descrevem o possível desenvolvimento em todo o planeta, levando em consideração especialmente a emissão de gases de efeito estufa (IPCC, 2007; IPCC-TGICA, 2007).

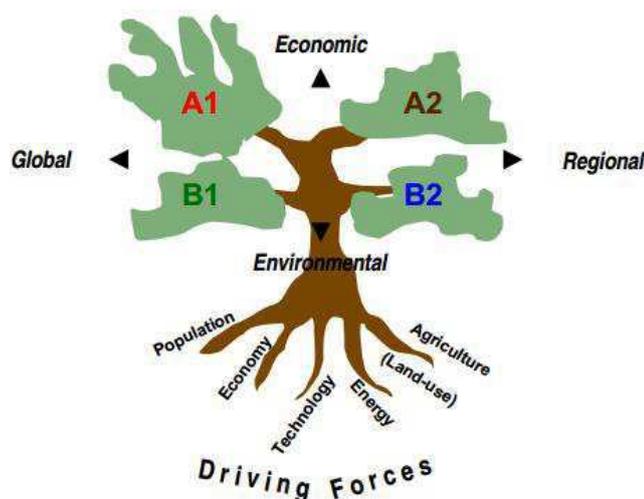


Figura 3 Ilustração das famílias de cenários de emissão de efeito estufa.  
Fonte: IPCC-TGICA (2007)

- Cenário A1: Conjunto de cenários que apresentam um mundo futuro com acelerado crescimento econômico, crescimento populacional até 2050, chegando a 9 bilhões, e depois decréscimo gradual, globalização dominante e grande disseminação de tecnologias novas e mais eficientes. Este grupo é subdividido em três, com base em sua ênfase tecnológica:
  - A1FI - ênfase em fontes fósseis.
  - A1B - A ênfase equilibrada em todas as fontes de energia (esse equilíbrio é definido pela não dependência excessiva de um tipo de fonte de energia).
  - A1T - Ênfase em fontes de energia não-fósseis.

- Cenário A2: Conjunto de cenários que descrevem um mundo bastante dividido, com países auto-suficientes e regionalização dominante, alto crescimento populacional e menor crescimento econômico, e lenta mudanças tecnológicas.
- Cenário B1: Conjunto de cenários semelhante aos cenários A1, porém ecologicamente mais amigável. Apontam para um rápido crescimento econômico e mesmo crescimento populacional esperado nos cenários A1, entretanto, com a introdução de tecnologias limpas e ênfase em soluções globais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental;
- Cenário B2: Conjunto de cenários que preveem um mundo dividido, como no conjunto de cenários A2, mas com crescimento econômico intermediário, mudança tecnológica mais lenta que em A1 e B1, com constante crescimento populacional (em ritmo menor que A2), e ênfase em soluções locais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental;

As simulações dos MCG's resultam em anomalias climáticas, que são as diferenças numéricas entre os valores simulados de certa variável pelo modelo climático, considerando o cenário de emissão de gases do efeito estufa para certo horizonte no futuro, e os valores daquela variável simulada para o cenário de referência (IPCC, 2001), as anomalias fornecidas pelo IPCC são médias mensais dos 30 anos em estudo e é dado é mm/dia.

Para se estimar os possíveis impactos gerados por estas mudanças é necessário, além de descrições quantitativas de mudanças no clima futuro, gerar um cenário de referência ou *baseline* da região estudada, que nada mais é que caracterizá-la climatologicamente.

Um dos principais problemas científicos na estimativa de impactos de mudanças climáticas é a transferência das projeções, pelos modelos climáticos, das variáveis

climáticas para a simulação dos impactos nos diversos aproveitamentos hídricos - como cisternas ou reservatórios, por exemplo - e nos processos hidrológicos - como evaporação, evapotranspiração, escoamento, produção de sedimentos, etc. Estes desafios são decorrentes da baixa resolução espacial dos modelos climáticos e da pouca informação por eles providas (apenas variações na média e sem informações sobre mudança na variância).

Silveira *et al.* (2012), no estudo em que comparou os MCGs no tocante às suas capacidades de representação da sazonalidade da precipitação para o clima atual na região Nordeste, observou que, em geral, os modelos capturam os padrões de variações sazonais, embora sejam divergentes em relação à quantidade de chuva, sobretudo no período chuvoso. Observou também que a maioria dos modelos superestimam a precipitação na pré-estação chuvosa e a subestimam na pós-estação chuvosa, possivelmente consequência da baixa resolução dos modelos, que os impede de representar os padrões de variação em mesoescala. O mesmo estudo aponta para a dificuldade de presumir o ciclo anual pluviométrico sobre o leste do Nordeste Brasileiro, onde está localizada parte da área de estudo deste trabalho.

Embora haja esse e outros trabalhos que comparam e avaliam os resultados dos MCGs para diferentes regiões do país e do mundo, a ponderação das projeções dos modelos em função das suas capacidades de reprodução do clima atual não faz parte dos objetivos deste trabalho, que considera os 19 modelos com mesmo peso.

Dessa forma, foram desenvolvidas técnicas de *downscaling* para redução da escala dos MCGs, que considerem as características locais, permitindo uma análise mais robusta. Há duas classificações de *downscaling*: *downscaling* estatístico e *downscaling* dinâmico. O *downscaling* estatístico consiste em reduzir a escala de projeção através de funções determinísticas ou estocásticas, enquanto o dinâmico

transfere os resultados obtidos em uma grade grosseira para Modelos Climáticos Regionais com resolução refinada (LUCENA, 2010).

As funções utilizadas para o *downscaling* estatístico, em geral, são estimadas empiricamente a partir de séries históricas de dados observados, conseqüentemente considerando estas relações como verdadeiras para um clima futuro (LUCENA, 2010). Segundo Fowler *et al.* (2007), os métodos estatísticos são mais simples do que a redução de escala através do *downscaling* dinâmico, mas tendem a subestimar a variância e a não representar bem eventos extremos.

Os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos podem ser estimados, segundo Arnell (1992), seguindo quatro passos, se for considerado como hipótese que o modelo hidrológico e seus parâmetros são válidos tanto para o clima atual quanto para o futuro:

1. Definição dos parâmetros do modelo hidrológico para o objeto de estudo (bacia hidrográfica ou reservatório);
2. Perturbação das séries históricas com cenários de mudanças no clima;
3. Simulação do objeto de estudo sob as condições climáticas atuais e prospectivas;
4. Comparação das simulações para os cenários atual e futuro.

A perturbação das séries históricas com cenários futuros de clima pode ser realizada através do Método do Delta, que consiste em adicionar as anomalias prospectivas, no caso dos MCGs em escala global, às séries históricas regionais ou locais. Este método é considerado por alguns pesquisadores uma forma de *downscaling* que aplica os resultados estimados para larga escala (pelo MCGs) em dados históricos locais (ou regionais). O Método do Delta embora seja considerado por alguns um método “limitado” foi utilizado em diversos estudos (GELLENS &

ROULIN, 1998; LOIACIGA et al., 2000; MORRISON et al., 2002; MERRIT et al., 2006, GALVÃO *et al.*, 2011, BRAGA *et al.*, 2012, DANTAS *et al.*, 2012).

As mudanças climáticas têm sido foco de pesquisas em todo o mundo e têm despertado preocupação dos possíveis impactos sobre os diversos setores. As mudanças no clima têm consequências diretas sobre os recursos hídricos e aumentam consideravelmente o grau de incertezas na gestão desses recursos. O Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), em seu quarto relatório, advertiu que o aquecimento global acarretará um aumento significativo de fenômenos climáticos e meteorológicos extremos como secas, ondas de calor e eventos de chuvas intensas (IPCC, 2007). Esta afirmação tem gerado preocupação mundial acerca de como se adaptar a tais mudanças, e concomitantemente, como mitigar os seus efeitos.

### ***3.4. Captação de Água de Chuva x Mudanças Climáticas***

Com o alerta mundial acerca das possíveis mudanças climáticas tem-se buscado alternativas de adaptação nos diversos setores. Quanto à disponibilidade hídrica, a captação da água de chuva tem sido foco de discussões em algumas partes do mundo como uma estratégia de adaptação às mudanças climáticas.

Pandey *et al.* (2003) sugerem o uso da captação de água de chuva como alternativa às possíveis mudanças climáticas, partindo do exemplo da civilização Maia, que enfrentou secas recorrentes à cerca de 3000 anos atrás e encontrou na captação da água da chuva uma importante fonte de abastecimento.

Han & Mun (2011) apresentam a experiência da Coreia do Sul no uso da captação da água da chuva para abastecimento e controle de inundações no clima atual e o seu papel como estratégia de adaptação às mudanças no clima.

Na Malásia, algumas regiões têm experimentado períodos longos de seca e conseqüentemente, de estresse hídrico. Nasir *et al.* (2009) propõem a captação da água de chuva através dos telhados das residências, e seu armazenamento em tanques, como alternativa à indisponibilidade hídrica atual, e às mudanças climáticas que, segundo ele, são responsáveis pelos eventos extremos já em ocorrência.

Este trabalho não propõe o uso de SCACs como uma alternativa às mudanças climáticas, mas avalia os impactos destas na vulnerabilidade destes sistemas, e sugere medidas de adaptação destes ao clima futuro.

Entre os estudos semelhantes a este, com o intuito de avaliar e implantar SCACs incorporando cenários de mudanças climáticas, destacam-se Warrick & Urich (2009) e Kahinda *et al.* (2010).

Warrick & Urich (2009) utilizaram um modelo computacional para avaliar os riscos de vulnerabilidade dos SCAC, sob clima atual e futuro (2050), na região sudeste de Queensland, na Austrália. Foi simulada, no modelo SimCLIM, a precipitação em 37 pontos equidistantes, correspondentes aos pontos com série diária de precipitação observada no período de 1961-1990, considerando a cisterna como única fonte de abastecimento. Para o clima atual, foi simulado um SCAC que não apresentasse vulnerabilidade para a área úmida (região costeira), o que representa os seguintes parâmetros: 2 tanques de 45 m<sup>3</sup>, área de captação de 290 m<sup>2</sup>, e demanda diária de 550 l; além disso considerou-se que a família estaria preparada para até 2 dias sem água. Assim, foram calculadas duas vulnerabilidades: uma para a falta de água por menos de 2 dias, e outra por mais de 2 dias. Os resultados foram espacializados em mapas de risco divididos em três áreas: baixo risco: até 1 falha a cada 5 anos; médio risco: 1 falha de 2 a 5 anos, em média; e alto

risco: 1 ou mais falhas por ano. Observou-se que mais da metade da área foi considerada de baixo risco e que, nesta, o período mais longo sem água foi de 10 dias, e na área de alto risco este período foi superior a 20 dias.

Para incorporar as mudanças climáticas às simulações, foi usado o valor médio das anomalias de precipitação de 8 MCGs, considerando o cenário de emissão de gases de efeito estufa SRA1B. Estas anomalias apresentaram uma tendência geral regional de condições mais secas em 2050, com variação de cerca de 4% na parte sul da região e de 15% nas áreas costeiras do nordeste, quando reduções na precipitação resultariam em maiores efeitos sobre o desempenho dos SCAC (abril a setembro). As simulações apontaram para o aumento dos riscos de vulnerabilidade sob os SCACs concebidos sob clima atual, e para a expansão das áreas de risco elevado, indicando assim a necessidade de medidas de adaptação.

O trabalho propõe quatro medidas de adaptação: o aumento do tanque, a redução do consumo de água por dia, ou aumentar a área do telhado para captação de água e o aumento do limite tolerável através de uma melhor preparação para emergências. Cada medida foi simulada separadamente, para as áreas de risco elevado e médio, a fim de assegurar risco baixo no clima futuro. Neste caso, para áreas de risco médio, o aumento do tanque para 150 m<sup>3</sup> garantiria o baixo risco, que também pode ser alcançado com a adição de 10m<sup>2</sup> na área de captação, ou reduzindo a demanda em 2%, e elevando o limite de tolerância em 8 dias. Para área de risco elevado, o tanque quase que teria de quadruplicar de volume, chegando a 340 m<sup>3</sup>, ou a área de captação deveria aumentar 73 m<sup>2</sup>, ou o consumo deveria ser reduzido em 16%, ou está preparado para 21 dias de tanques vazios.

Kahinda *et al.* (2010) também propõem considerar as mudanças climáticas no dimensionando dos tanques na implementação de SCAC na África do Sul. No

estudo, a área de estudo foi dividida em quatro áreas, conforme o índice de aridez: semiárido, árido, úmido e sub-úmido seco; e foi utilizado um modelo de balanço hídrico que calcula a capacidade de armazenamento necessária, dadas a demanda diária e a área de captação, considerando que o SCAC não é a única fonte de abastecimento. Utilizaram-se séries diárias observadas para o clima atual e uma série diária de 20 anos de precipitação futura (2046-265), que incorpora as anomalias de precipitação fornecidas por 6 MCGs, extraídas por *downscaling* estatístico. Como parâmetros do sistema assumiram-se cisternas com 0,5 m<sup>3</sup> de capacidade e áreas de captação de 20 m<sup>2</sup>.

Para o clima atual, a tendência de precipitação nas quatro áreas requer tanques de tamanhos diferentes para garantir a segurança hídrica, embora as simulações que consideraram aumento de 0,5 e 1 m<sup>3</sup> nos tanques, não tenham resultado em aumento importante na garantia hídrica, que não ultrapassou os 30% na área úmida. Observou-se que a maioria dos modelos estima chuvas acima da tendência em três áreas (semiárida, úmida e sub-úmida seca), crescendo, conseqüentemente, 5 a 20% à garantia hídrica, e uma redução semelhante à garantia para a área árida. Concluem que os SCACs são importantes medidas de adaptação às mudanças climáticas, mas que precisam adaptar-se para alcançar seu potencial, levando em consideração as questões sociais e econômicas da África do Sul.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Área de Estudo

A área de estudo está inserida no Nordeste Brasileiro e é formada pelo retângulo que abrange o Estado da Paraíba, com pontos extremos de coordenadas -39.000 Lon e -8.2500 Lat; e -35.000 Lon e -5.7500 Lat, abrangendo 52 pontos equidistantes em 50 km, resolução dos dados pluviométricos utilizados (Figura 4). Os pontos escolhidos referem-se aos que dispõem de dados pluviométricos, sem falhas no período de 1961 a 1990.

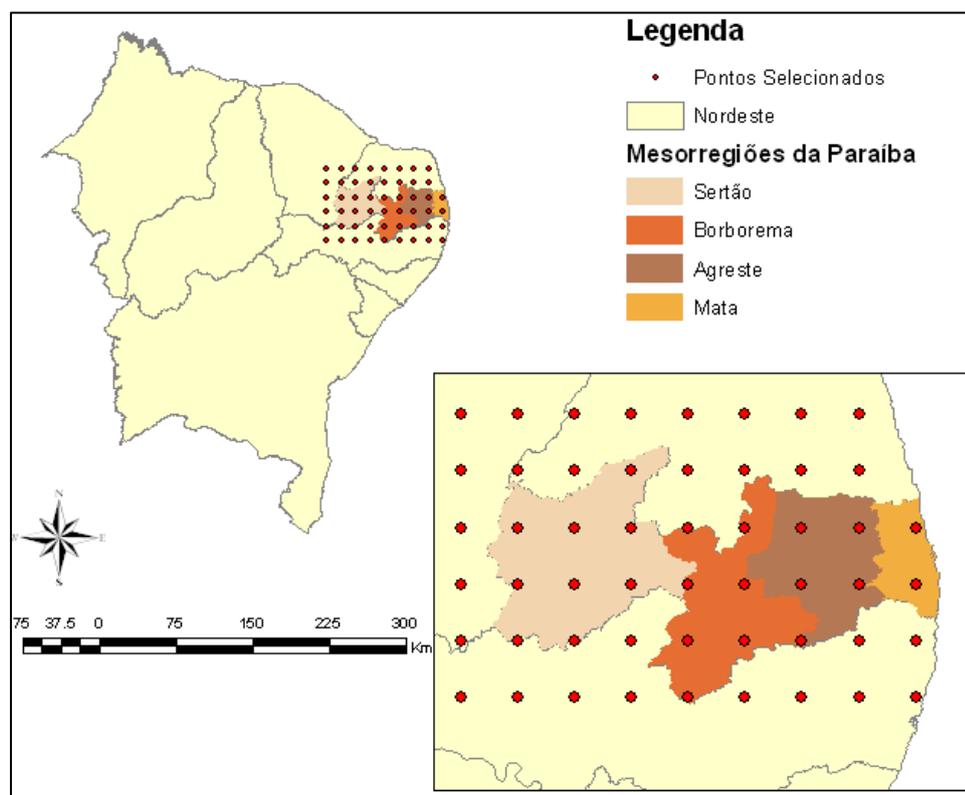


Figura 4 Localização da área de estudo e dos pontos selecionados.

Para aprofundar a análise dos resultados, dentro desta área foram selecionados três pontos (municípios) de três mesorregiões paraibanas, onde há cisternas: Alagoa

Nova, no agreste paraibano, com clima do tipo Tropical Chuvoso, com verão seco, estação chuvosa de janeiro/fevereiro a setembro/outubro e precipitação média anual de 1300 mm (CPRM, 2005a); Sumé, na mesorregião da Borborema/Cariri, com clima semiárido e estação chuvosa limitando-se a apenas 4 meses (janeiro/fevereiro a maio/junho) com total pluviométrico médio de 600 mm/ano (TAVEIRA, 2012); e Piancó, no sertão paraibano, também em clima semiárido, onde a estação chuvosa restringe-se ao mesmo período que Sumé, com total pluviométrico médio anual de 751 mm (CPRM, 2005b) (Figura 5).

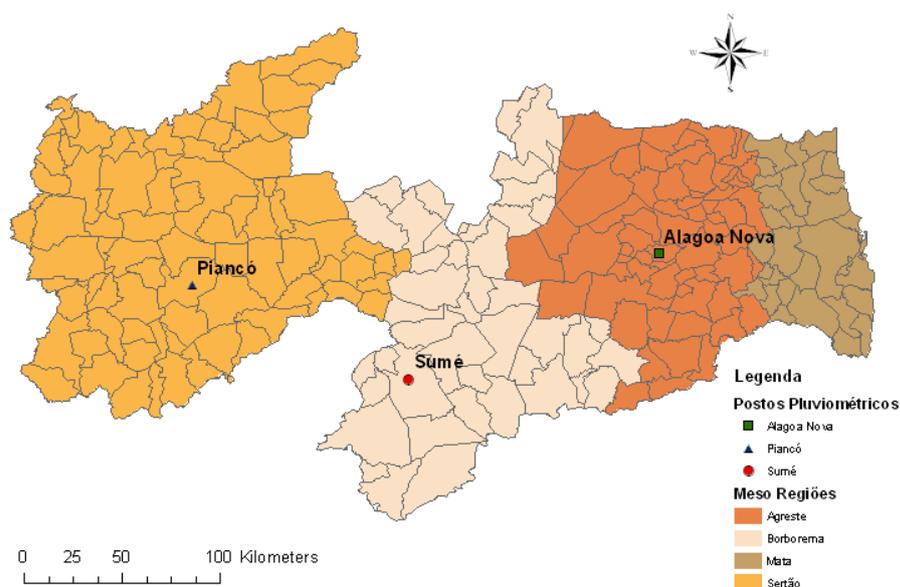


Figura 5 Municípios de Alagoa Nova (Brejo/Agreste), Sumé (Cariri) e Piancó (Sertão).

## 4.2. Formação do Banco de Dados

O levantamento dos dados para a formação da base do estudo iniciou-se através da extração de séries históricas de precipitação, do período de 1961 a 1990, fornecidos pela Climatic Research Unit (CRU) da University of East Anglia (Reino Unido), com resolução de  $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ , para os 52 pontos localizados na Paraíba e em seu entorno. Também foram utilizadas séries históricas de precipitação, do mesmo

período, fornecidas pela Agência Nacional de Águas – ANA, referentes aos postos pluviométricos dos municípios de Alagoa Nova, Sumé e Piancó.

Para os mesmos, com dados de precipitação observada para o período de representação do clima atual (1961-1990), foram extraídas anomalias de precipitação de 19 Modelos de Circulação Global (MCGs), considerando o cenário de emissão de gases de efeito estufa SRA1B, recomendado pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas, para os horizontes de 2050 (2040-2069) e 2100 (2070-2099), disponibilizadas no quarto relatório do IPCC (AR4).

A extração das anomalias foi executada com uma ferramenta de extração de variáveis climáticas da Plataforma SegHidro, baseada em grades computacionais e desenvolvida na Universidade Federal de Campina Grande, pelo projeto SegHidro, com o objetivos de executar aplicações de apoio à gestão sustentável de recursos hídricos. A aplicação utilizada, denominada de Mudanças Climáticas, utiliza-se do método de *downscaling* estatístico através da interpolação bilinear, que estima o dado de um ponto através de uma função de ponderação em relação à distância entre o ponto de interesse e os pontos vizinhos (SegHidro, 2009).

### **4.3. Modelo de Balanço Hídrico**

O modelo para avaliação dos SCAC foi concebido para realizar simulações de balanço hídrico de cisternas, que resultem na garantia/vulnerabilidade de abastecimento para diferentes cenários de mudanças no clima (MCGs), para três períodos distintos (Clima Atual, 2050 e 2100), para as características dos SCAC do P1MC: área de captação de 40 m<sup>2</sup>, capacidade volumétrica de 16 m<sup>3</sup> e demanda de 65 l/dia (aproximadamente 13 l/pessoa/dia para que a cisterna abasteça uma residência com 5 pessoas pelos 8 meses do período de estiagem), e para eficiência

do sistema de 75%. Neste trabalho, a demanda foi simulada para os 12 meses do ano.

#### 4.3.1. Cenários de Precipitação Futura

Os cenários de precipitação futura podem ser gerados a partir de séries históricas de precipitação e de anomalias futuras de precipitação, pelo Método do Delta. Este método consiste em somar a *baseline* (série histórica mensal de precipitação) às anomalias extraídas (IPCC, 2007).

Neste estudo, o método do Delta foi utilizado pós *downscaling* estatístico, apenas como um gerador de séries futuras de dados, ao se perturbar as séries históricas com as anomalias resultantes dos MCGs.

As anomalias de precipitação resultantes dos MCGs são fornecidas em média mensal (mm/dia) e, para aplicar o Método do Delta, a precipitação histórica mensal é somada ao produto da anomalia correspondente ao mês da precipitação e o número de dias do mês em questão.

#### 4.3.2. Cenários de Garantia Hídrica Futura

Os cenários de precipitação futura são submetidos a simulações de balanço hídrico, baseado na equação de balanço hídrico de reservatório:

$$Vd_t = \text{Min} (Vd_{t-1} + Vcap_t - Vcon_t, Ca) \quad (3.1)$$

onde:  $Vd_t$  é o volume disponível no instante  $t$  ( $m^3$ );

$Vd_{t-1}$  é o volume disponível no instante  $t-1$  ( $m^3$ );

$Vcap_t$  é o volume captado durante o período entre os instantes  $t-1$  e  $t$  ( $m^3$ );

$Vcon_t$  é o volume consumido no período entre os instantes  $t-1$  e  $t$  ( $m^3$ ); e

$Ca$  é a capacidade volumétrica da cisterna ( $m^3$ ).

Considerando-se que na primeira etapa de cálculo o  $Vd_{t-1}$  é calculado como:

$$Vd_{t-1} = \text{Min} \left( \frac{CVI \cdot Ca}{100} + Vcap_t - Vcon_t, Ca \right) \quad (3.2)$$

onde: CVI é o coeficiente de volume inicial que varia entre 0 e 100.

Os volumes captado e consumido ( $Vcap$  ( $m^3$ ) e  $Vcon$  ( $m^3$ )) entre os instantes  $t-1$  e  $t$  são calculados por:

$$VCap_t = (Ac \cdot C \cdot P_t) / 1000 \quad (3.3)$$

$$VCon_t = \text{Min}(D, Vd_{t-1} + Vcap) \quad (3.4)$$

Para o primeiro período da simulação, o Volume Consumido é expresso por:

$$VCon_t = \text{Min}(D, \frac{CVI \cdot Ca}{100} + Vcap) \quad (3.5)$$

onde:  $Ac$  é a área de captação ( $m^2$ );

$C$  é o coeficiente de eficiência do sistema (%);

$P_t$  é a precipitação em milímetros ocorrida no período entre os instantes  $t-1$  e  $t$ ;

$D$  é a demanda hídrica da família usuária do SCAC ( $m^3$ ).

Após a realização destas etapas de cálculos para um intervalo de tempo especificado (dias, meses ou anos; neste trabalho foi adotado o intervalo mensal), o modelo gera, para cada sistema e ponto em análise a garantia hídrica ( $G$ ) e seu complemento, o déficit ( $Def$ ) ou vulnerabilidade:

$$G = \frac{Pda}{P_t} \times 100\% \quad (3.6)$$

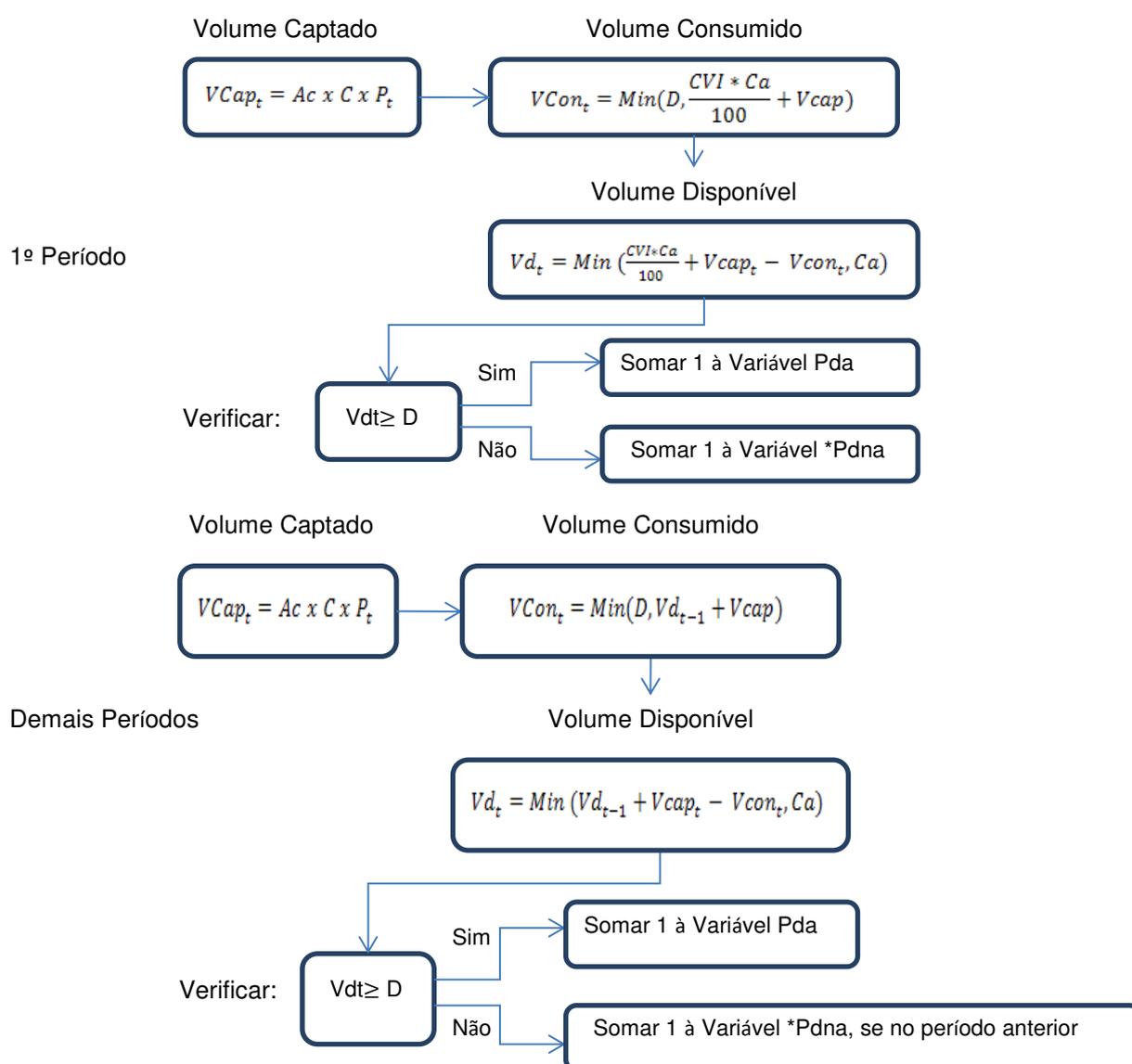
$$Def = 100\% - G \quad (3.7)$$

onde:  $Pda$  é a quantidade de períodos onde a demanda foi atendida ( $Vd_t > D_t$ );

e  $P_{totais}$  é o número de períodos totais da simulação.

Neste trabalho foi adotado o intervalo de tempo mensal, tendo em vista que observou-se que os resultados obtidos com a geração de séries futuras de precipitação diária não se mostraram tão representativos quanto os obtidos em escala mensal.

De modo a exemplificar melhor o fluxo de cálculos é apresentado na Figura 6 um fluxograma.



\*Pdna é a quantidade de períodos em que a demanda não foi atendida.

Figura 6 Esquema gráfico do fluxo de cálculos da vulnerabilidade dos SCAC.  
Fonte: SegHidro (2009)

### 4.3.3. Avaliação do Impacto das Mudanças Climáticas sobre as Cisternas

A análise do possível impacto das mudanças climáticas sobre as cisternas é feita conforme metodologia de Arnell (1992), comparando-se os resultados prospectivos de garantia e vulnerabilidade obtidos em cada simulação para cada modelo e particularidades dos SCAC nos horizontes de 2050 e 2100, com os resultados obtidos para o clima atual.

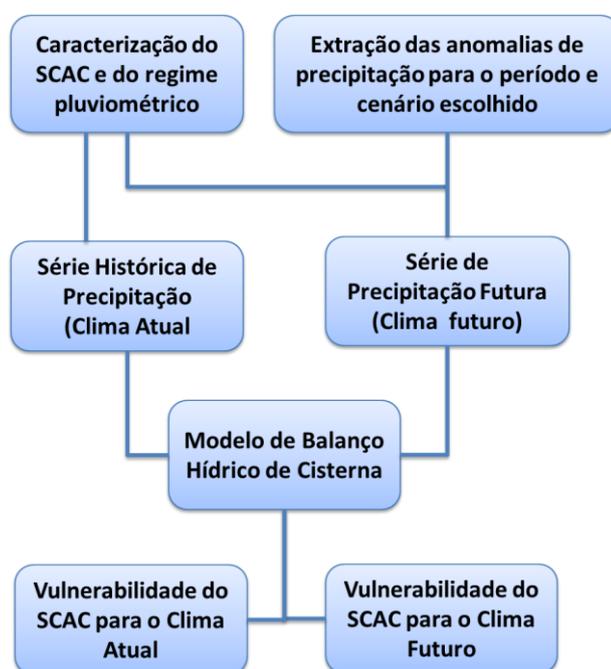


Figura 7 Fluxograma da metodologia aplicada.

A diferença numérica entre estes resultados expressa o impacto das possíveis mudanças sobre estes sistemas.

Neste estudo, as métricas estatísticas utilizadas para comparar os resultados foram Mediana, Média Aritmética, Máxima, Mínima e Quartis de 25% e 75%.

### 4.3.4. Adaptação

Para a simulação de medidas adaptativas nos SCAC que minimizem sua vulnerabilidade (déficit hídrico), os parâmetros referentes a esta mudança devem ser

incorporados na simulação. Neste trabalho, embora todas as variáveis referentes ao sistema podem ser variadas, como um exemplo, é proposto um acréscimo de 50% na área de captação. Considerando que esta medida seja facilmente implementada, considerando que seu custo é inferior à construção de uma nova cisterna, por exemplo.

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 5.1. Cenários de Impactos na Precipitação

As anomalias de precipitação para os 52 pontos da área de estudo foram extraídas para os 19 MCG's que as dispunham para o horizonte de 2050 (BCM2, CGMR, CNCM3, CSMK3, ECHOG, FGOALS, GFCM20, GFCM21, GIAOM, GIEH, HADCM3, HADGEM, INCM3, MIHR, MIMR, MPEH5, MRCGCM, NCCCSM E NCPCM) e para o horizonte de 2100 (BCM2, CGMR, CNCM3, CSMK3, ECHOG, FGOALS, GFCM20, GFCM21, GIAOM, GIEH, HADCM3, HADGEM, INCM3, IPCM4, MIHR, MIMR, MPEH5, MRCGCM e NCCCSM), através de *downscaling* estatístico disponível na ferramenta Mudanças Climáticas, da Plataforma SegHidro.

As anomalias para os horizontes de 2050 e 2100 apresentaram diferenças com grande magnitude entre as projeções dos modelos para cada um dos pontos. Para 2050, essa diferença variou entre 9 e 178 mm/mês, e para 2100 entre 8 e 402 mm/mês.

Para os três pontos representativos de três mesorregiões da área de estudo, as anomalias médias mensais, em média, não apresentam grande variação, quando considerados os 19 MCGs, para 2050. Entretanto, apresentam magnitude expressiva nas diferenças das anomalias na pré-estação chuvosa e no período chuvoso, confirmando os resultados da análise dos MCGs realizada por Silveira *et al* (2012) que conclui que os modelos do IPCC conseguem capturar os padrões de variações sazonais, embora diverjam no aspecto quantitativo. As anomalias dos

meses do período chuvoso tiveram reduções médias de 0,25 mm/dia e máxima de até 3,24 mm/dia e aumento de até 2,08 mm/dia (Figura 8).

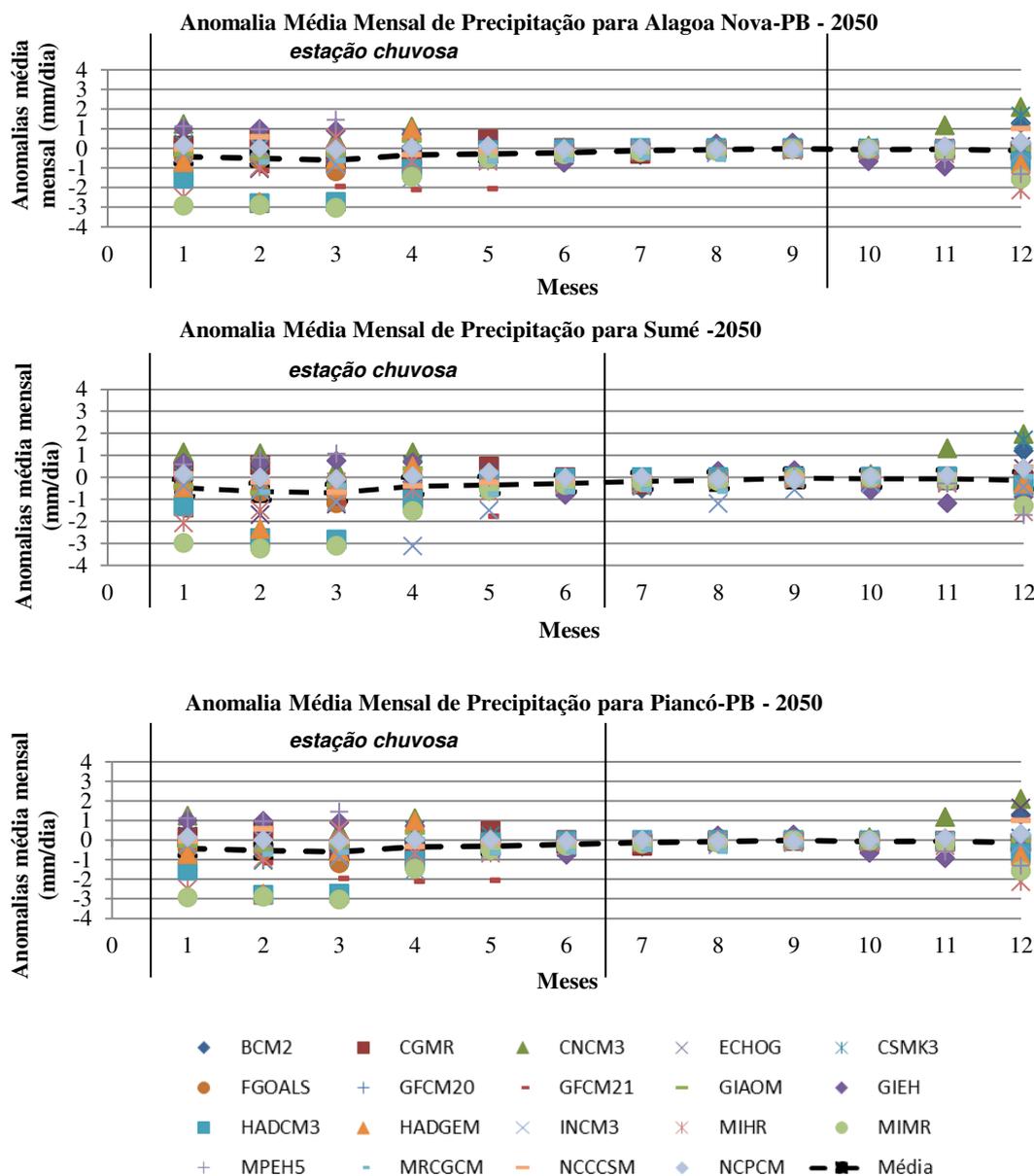


Figura 8 Anomalias médias mensais de precipitação para 2050, para os 19 modelos climáticos

Para o horizonte de 2100, as anomalias também foram discrepantes. O modelo HADGEM, por exemplo, para os municípios de Alagoa Nova e Sumé, forneceu anomalias consideradas altas e opostas à maioria dos modelos (Figura 9). Mesmo este modelo influenciando consideravelmente na análise estatística das séries de anomalias é importante mencionar que, segundo Silveira *et al* (2012; 2013), este

modelo é o 6º melhor em representar a sazonalidade da precipitação na região Nordeste Setentrional.

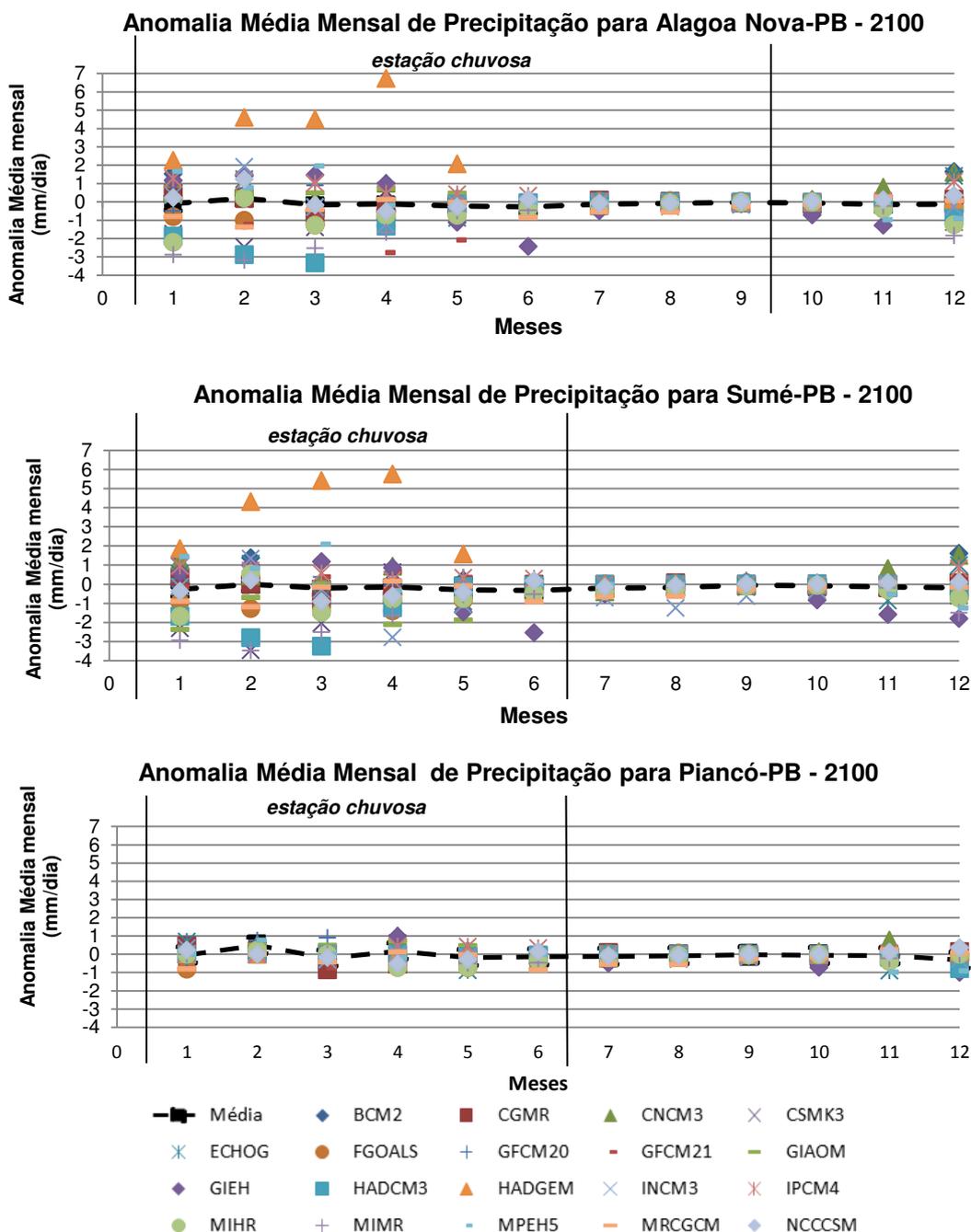


Figura 9 Anomalias médias mensais de precipitação para 2100, para os 19 modelos climáticos.

Os cenários de precipitação futura gerados com as anomalias médias e mínimas mostram reduções relevantes, sobretudo nos meses chuvosos para todos os pontos. Para 2050, a Figura 10 apresenta os resultados para os municípios de Alagoa Nova,

Sumé e Piancó.

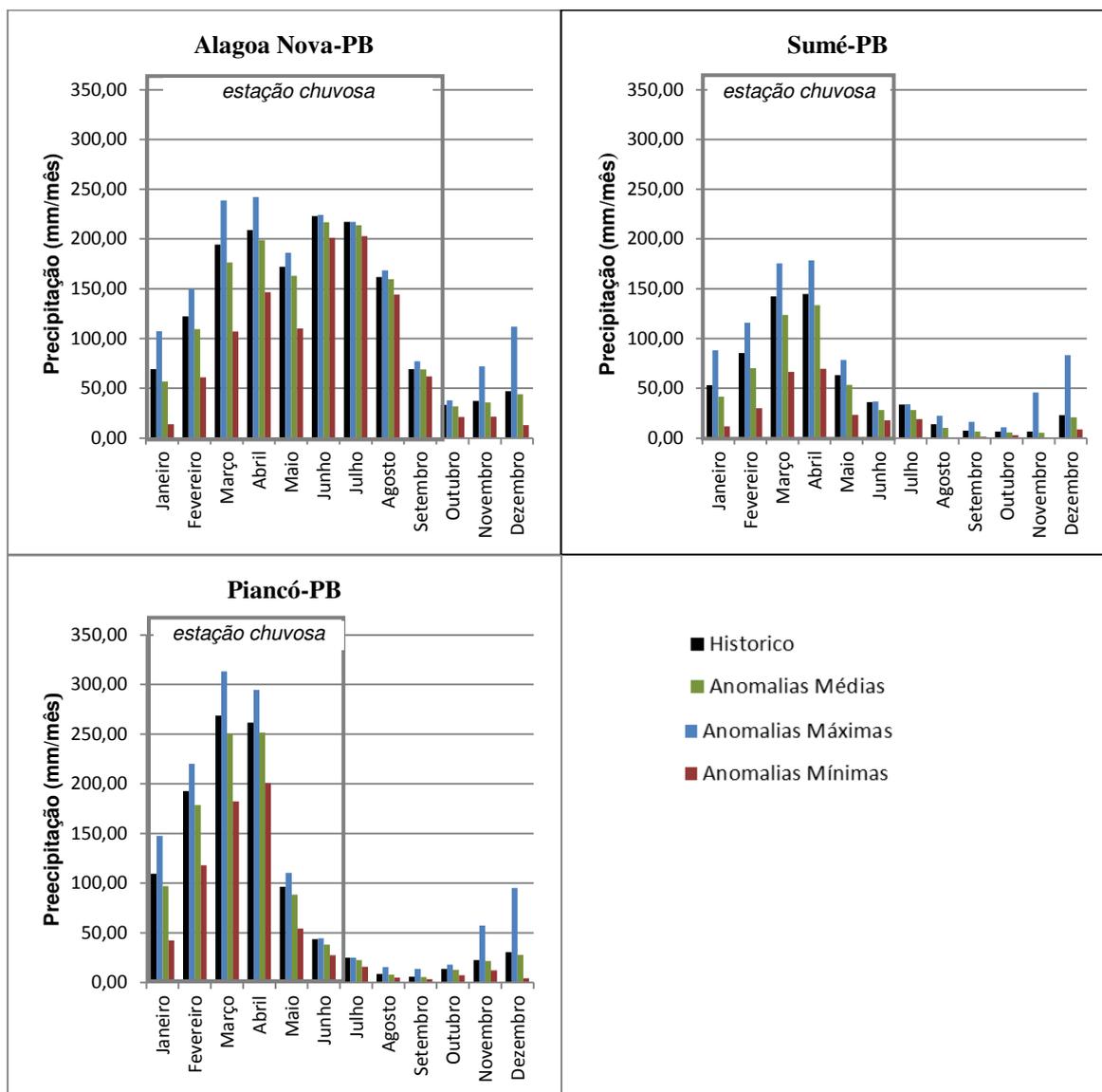


Figura 10 Precipitações médias mensais históricas e futuras (2050) com anomalias máximas, médias e mínimas.

Já para 2100 observam-se comportamentos diferentes na precipitação de cada município. Em Alagoa Nova, as séries futuras de chuva formadas pelas anomalias de limites inferiores (aqui chamadas de mínimas) remetem a uma mudança importante na sazonalidade do regime pluviométrico, indicando um possível deslocamento e redução da estação chuvosa para os meses de abril a novembro, com redução volumétrica média de 32,53%. Os valores obtidos com as anomalias médias descrevem apenas um pequeno deslocamento na estação chuvosa, que

concentraria os maiores volumes de precipitação nos meses de abril a outubro e não de fevereiro a agosto, como no clima atual. Já as séries obtidas com as anomalias de limites superiores (aqui denominadas de anomalias máximas) apontam para um acréscimo médio de 48,63% no volume pluviométrico, e a expansão da estação chuvosa para 12 meses (Figura 11).

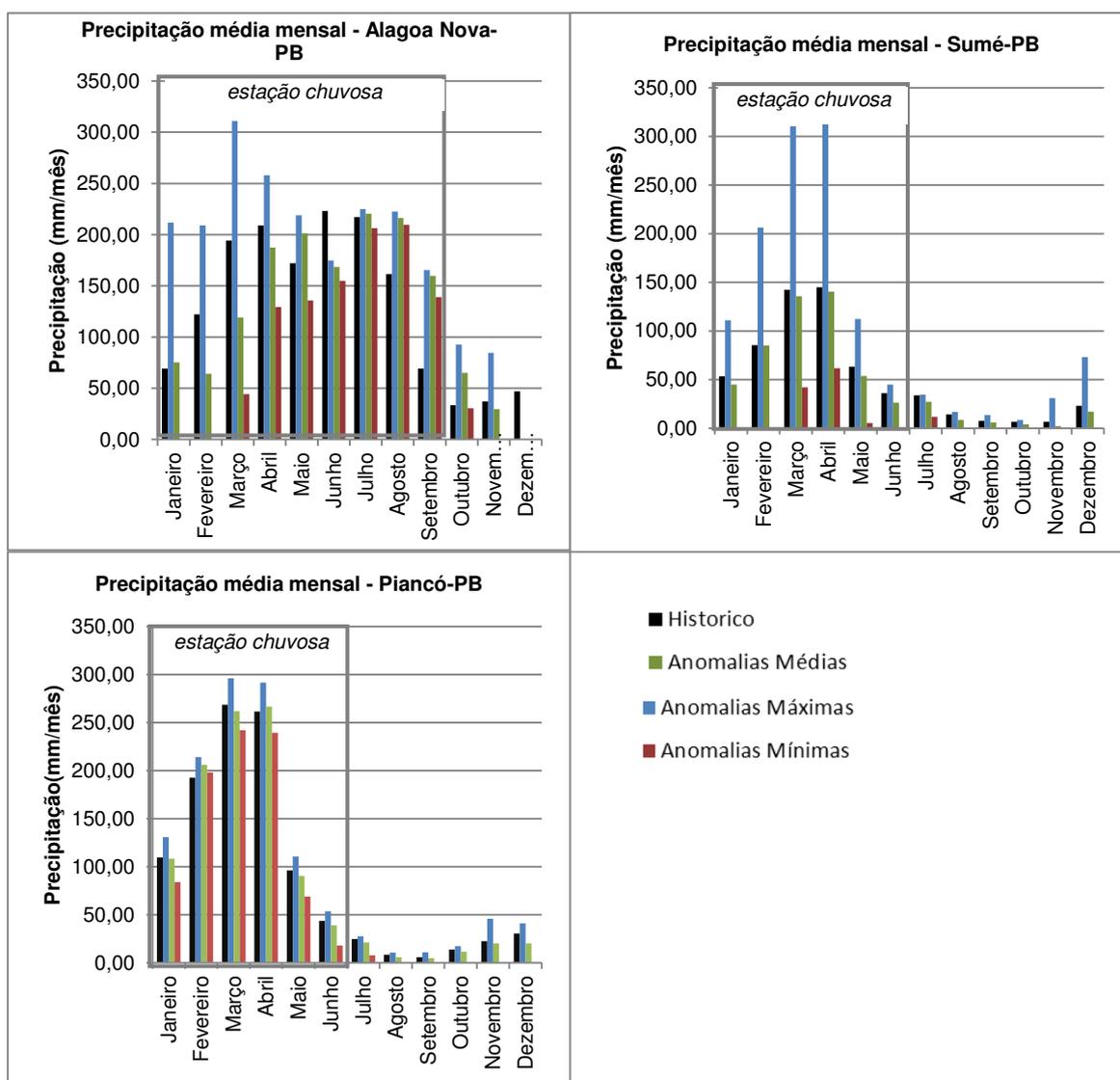


Figura 11 Precipitações médias mensais históricas e futuras (2100) com anomalias máximas, médias e mínimas.

Para Sumé, observa-se que as anomalias médias não reflete mudanças importantes: estima-se apenas uma redução volumétrica média de 10,64%. Já as anomalias máximas indicam uma pequena expansão na estação chuvosa,

antecipando-a para o mês de dezembro, e crescendo, em média, 107,45% no volume precipitado. As anomalias mínimas podem provocar uma redução média de 80,44%. Já em Piancó os impactos das anomalias médias e máximas apresentam-se tênues, enquanto que as anomalias mínimas podem significar uma redução média de 20,4% na precipitação (Figura 11).

## 5.2. Cenários de Impactos nos SCACs

O balanço hídrico das cisternas dos SCAC indicou que, para o clima atual, a vulnerabilidade desses sistemas já é alta em grande parte da área de estudo. Observou-se que 50% dos resultados estimam o déficit hídrico entre 13,82% e 32,15% (Figura 12 e Figura 13).

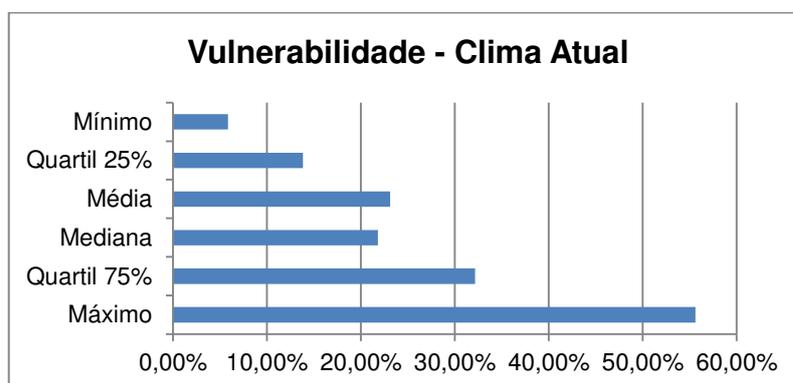


Figura 12 Vulnerabilidade para o clima atual (1961-1990).

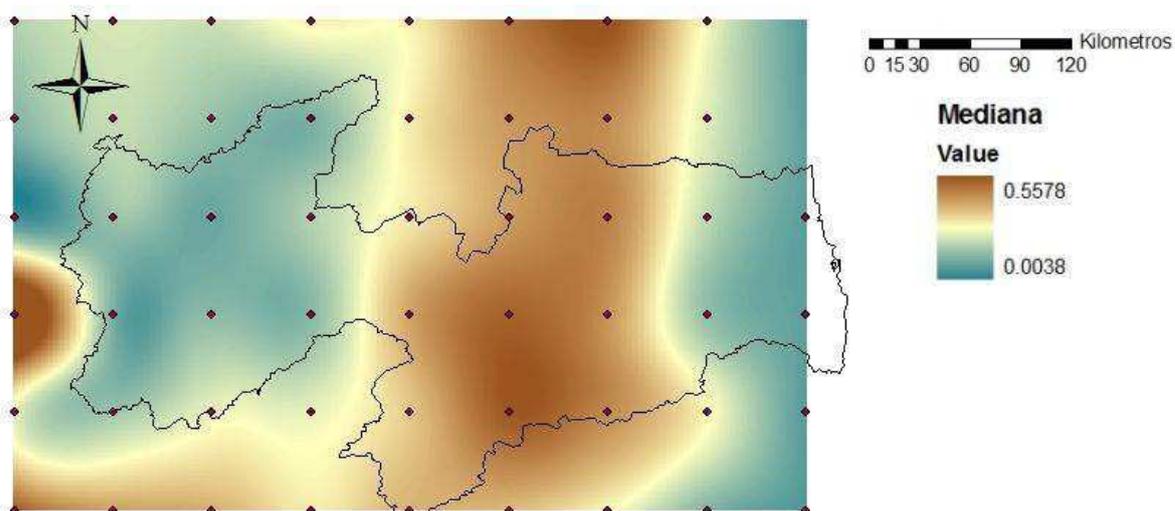


Figura 13 Espacialização da vulnerabilidade para o clima atual (1961-1990).

O impacto das mudanças na precipitação refletiu-se na vulnerabilidade dos SCAC. As vulnerabilidades que já são altas para o clima atual em grande parte do Estado da Paraíba, para 2050 tendem a ser acrescidas em média 4,35%. Em um cenário que considere os resultados de limites inferiores (pessimista), esse aumento em média é de 29,35%, e em um cenário otimista (que utiliza os resultados de limites superiores) podem ser reduzidas em média 12,64% (Figura 14).

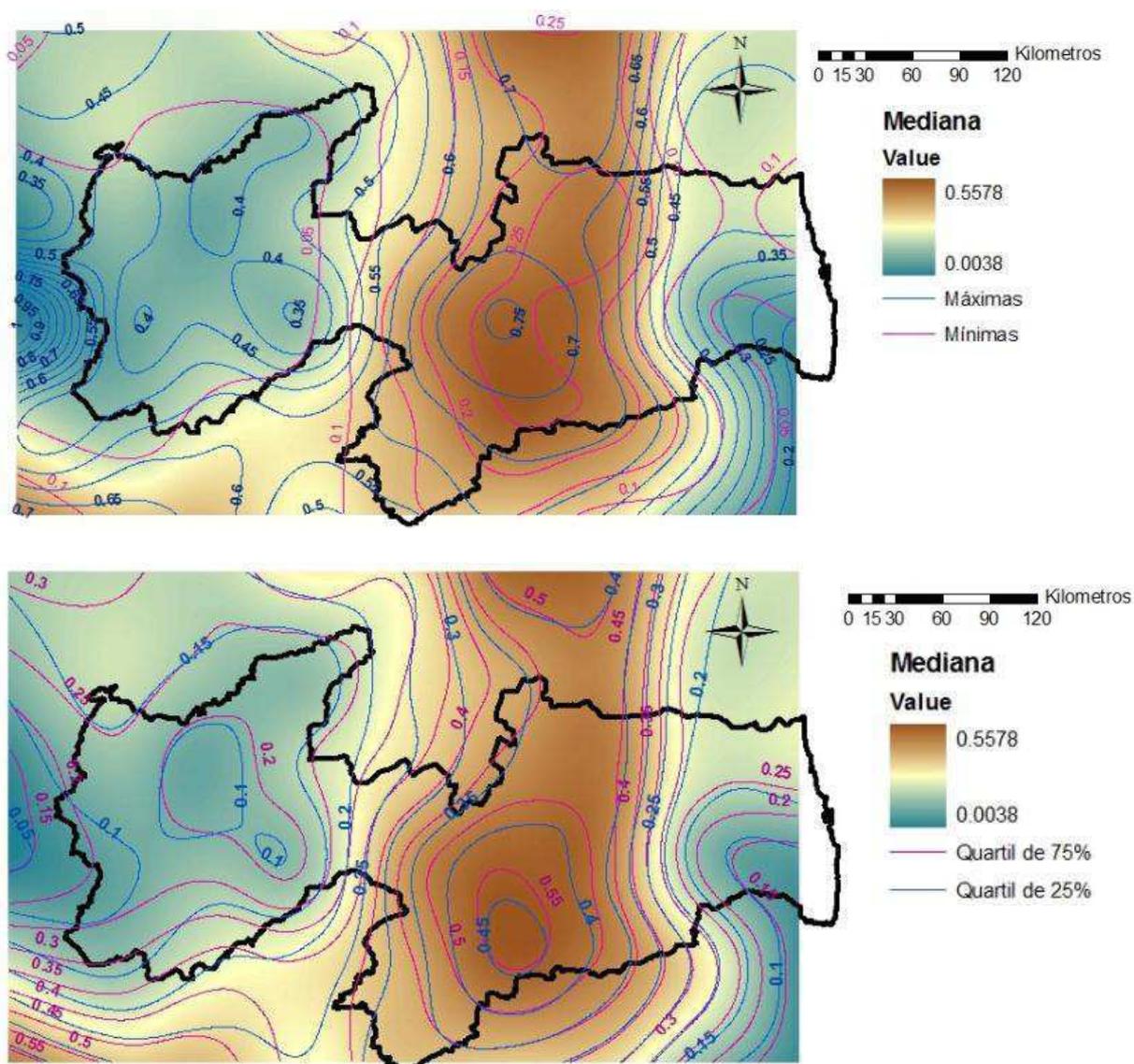


Figura 14 Vulnerabilidades máximas, mínimas, medianas e quartis de 25% e 75%, para 2050, SRA1B.

Para 2100, em média espera-se um aumento da vulnerabilidade de 0,33%; em um cenário pessimista esse acréscimo pode chegar a 33,73%, em média, e em um

cenário otimista, em média, pode haver redução de 18,44% (Figura 15).

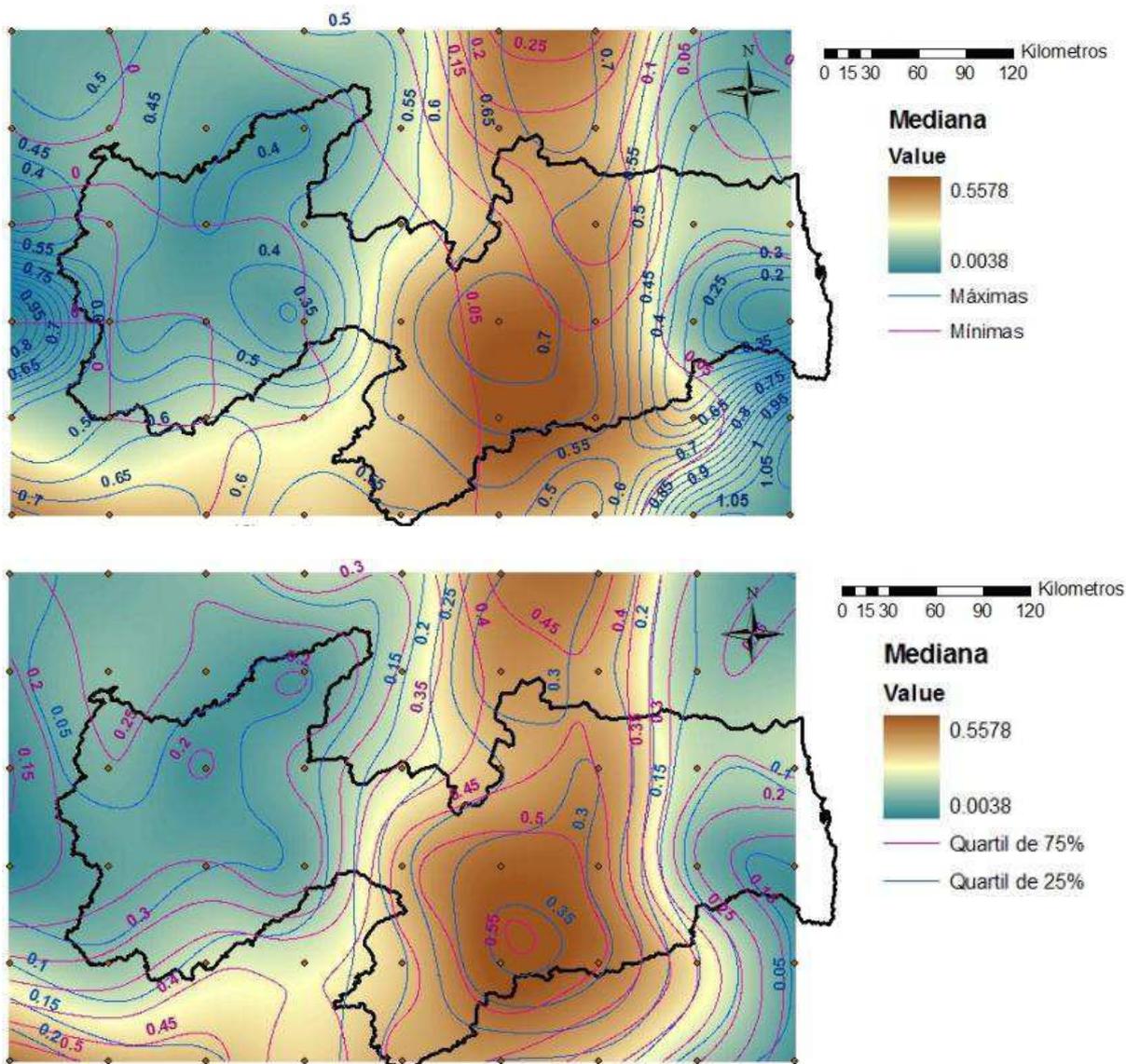


Figura 15 Vulnerabilidades máximas, mínimas, medianas e quartis de 25% e 75%, para 2100, SRA1B.

As vulnerabilidades futuras, para os dois horizontes (2050 e 2100), são maiores que as atuais. A Tabela 3 mostra as médias sobre toda a área de estudo (52 pontos) dos valores dos descritores estatísticos. Observa-se o decréscimo da vulnerabilidade em 2100 em relação à vulnerabilidade em 2050 em quatro dos descritores estatísticos, resultantes do cenário de emissão de gases de efeito estufa utilizado nas simulações, que prevê crescimento populacional até 2050 seguido de decréscimo gradativo.

Tabela 3 Vulnerabilidades atual e futuras para área de captação de 40 m<sup>2</sup>. Os valores se referem às médias, para cada descritor, no conjunto de 52 pontos na área de estudo.

Cenário		Vulnerabilidade
Atual	Média	23,08%
2050	Mínima	10,17%
	Quartil de 25%	22,38%
	Mediana	27,06%
	Quartil de 75%	32,99%
	Máxima	52,03%
2100	Mínima	4,22%
	Quartil de 25%	14,06%
	Mediana	22,40%
	Quartil de 75%	32,57%
	Máxima	56,59%

Nos municípios de Sumé e Piancó, ambos localizados em regiões com vulnerabilidade atual alta, em 2050 é esperado um aumento na vulnerabilidade média de 27,3% e 33,6%, respectivamente, em relação à vulnerabilidade média atual. Para Alagoa Nova, onde a vulnerabilidade atual é pequena, o acréscimo esperado supera 316% em relação à vulnerabilidade média atual (Tabela 4). As altas vulnerabilidades atuais e prospectivas alertam sobre a necessidade de ações de adaptação para mitigar o déficit hídrico atual e suscitar maior segurança hídrica nos anos vindouros.

Tabela 4 Vulnerabilidades atuais e futuras (2050) para os SCAC com características do P1MC.

Localidade	Cenário	Vulnerabilidade	
<b>Alagoa Nova</b>	Atual	3,6%	
	Futuro	Mínima	0%
		Média	6,7%
		Máxima	15,0%
<b>Sumé</b>	Atual	31,9%	
	Futuro	Mínima	5,0%
		Média	40,6%
		Máxima	75,0%
<b>Piancó</b>	Atual	12,5%	
	Futuro	Mínima	0,8%
		Média	16,7%
		Máxima	37,5%

### 5.3. Cenários de Adaptação

Como uma possível ação de adaptação, simulou-se o aumento da área de captação (telhado) assumida como referência pelo P1MC (40 m<sup>2</sup>), em 50%. O acréscimo de 20 m<sup>2</sup> propiciou redução importante da vulnerabilidade futura que considera a área de captação de referência (40m<sup>2</sup>).

Para 2050, as reduções médias nas vulnerabilidades mínima, mediana e máxima foram de 8,4%, 14,88% e 16,71%, respectivamente, e para 2100, 3,21%, 13,74% e 16,31%, respectivamente (Figura 16).

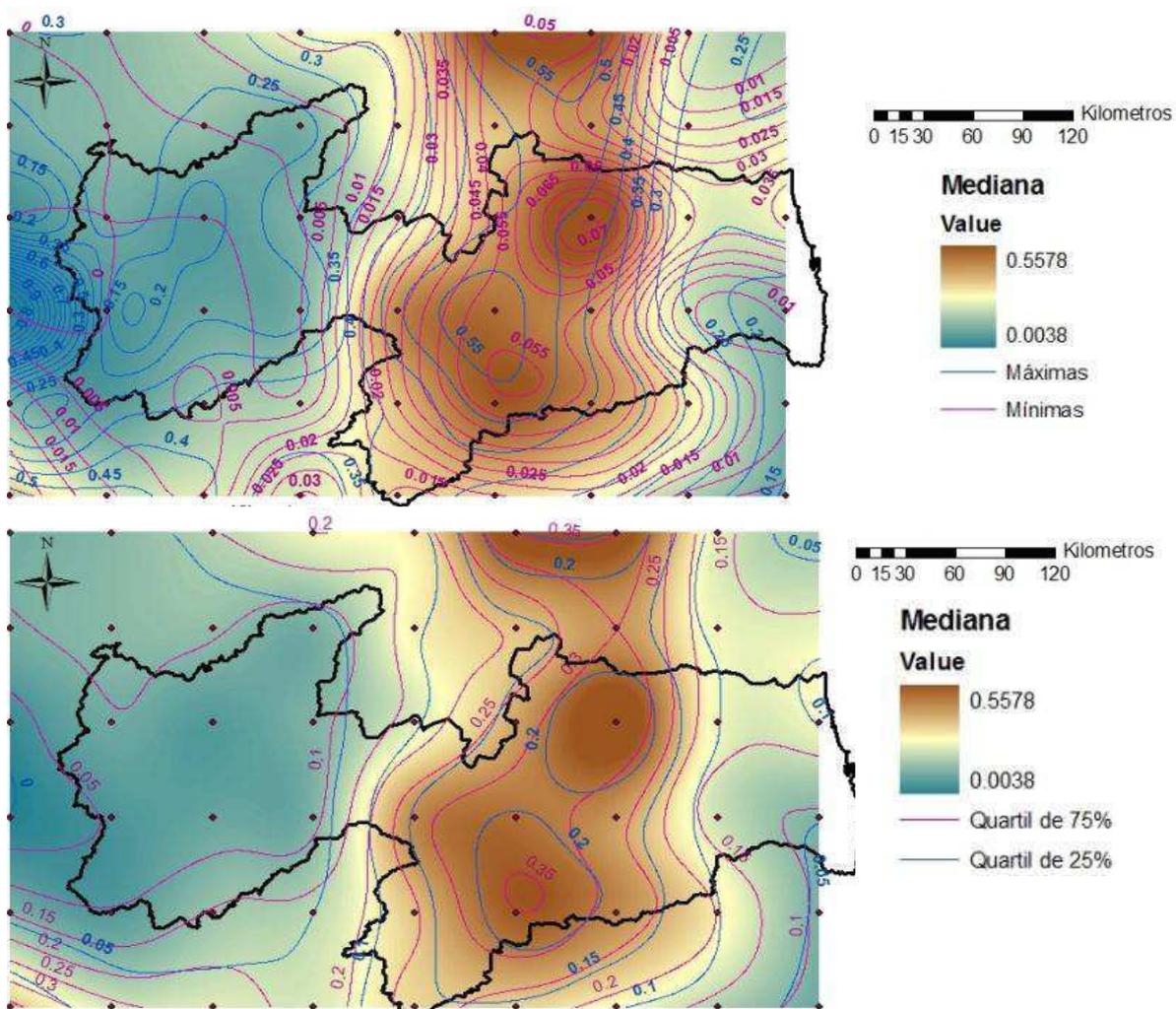


Figura 16 Vulnerabilidades futuras para 2050, para área de captação de 60m<sup>2</sup>.

Na Figura 17 é possível comparar as vulnerabilidades obtidas para o clima atual e através das séries futuras de precipitação para a área de captação assumida no P1MC (40m<sup>2</sup>) e para a medida adaptativa de aumento do telhado em 50% (60m<sup>2</sup>). Observa-se que a vulnerabilidade atual (clima atual e 40m<sup>2</sup> de área de captação) é semelhante à vulnerabilidade futura (2050) de Quartil de 25% para área de 40m<sup>2</sup> e um pouco maior que a do Quartil de 75% para área de 60m<sup>2</sup>. Ou seja, há cerca de 75% de chance de obter-se vulnerabilidades futuras menores que as atuais com esta medida adaptativa.

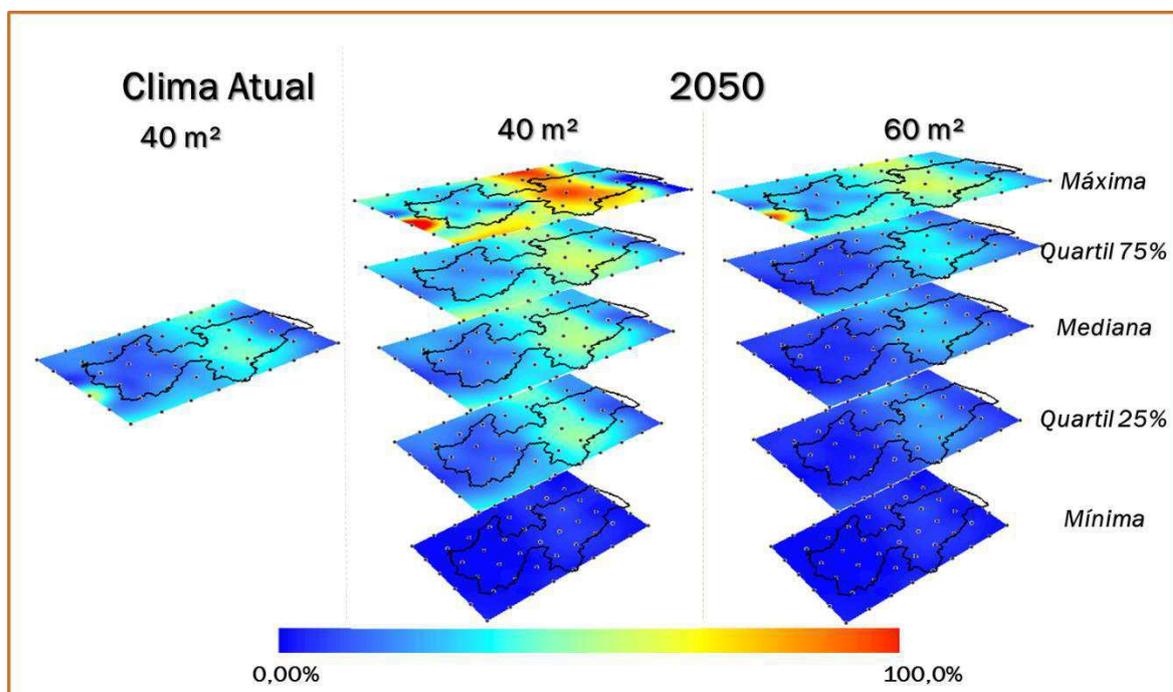


Figura 17 Comparação das vulnerabilidades para clima atual e (2050) para áreas de captação de 40m<sup>2</sup> com vulnerabilidades futuras (2050) para área de captação de 60m<sup>2</sup>.

Para 2100, com o aumento na área de captação, as mudanças nas vulnerabilidades futuras indicam impacto ainda importante na vulnerabilidade média atual, porém, consideravelmente menores que as vulnerabilidades futuras para áreas de captação igual a 40 m<sup>2</sup> (Figura 18 e Tabela 5).

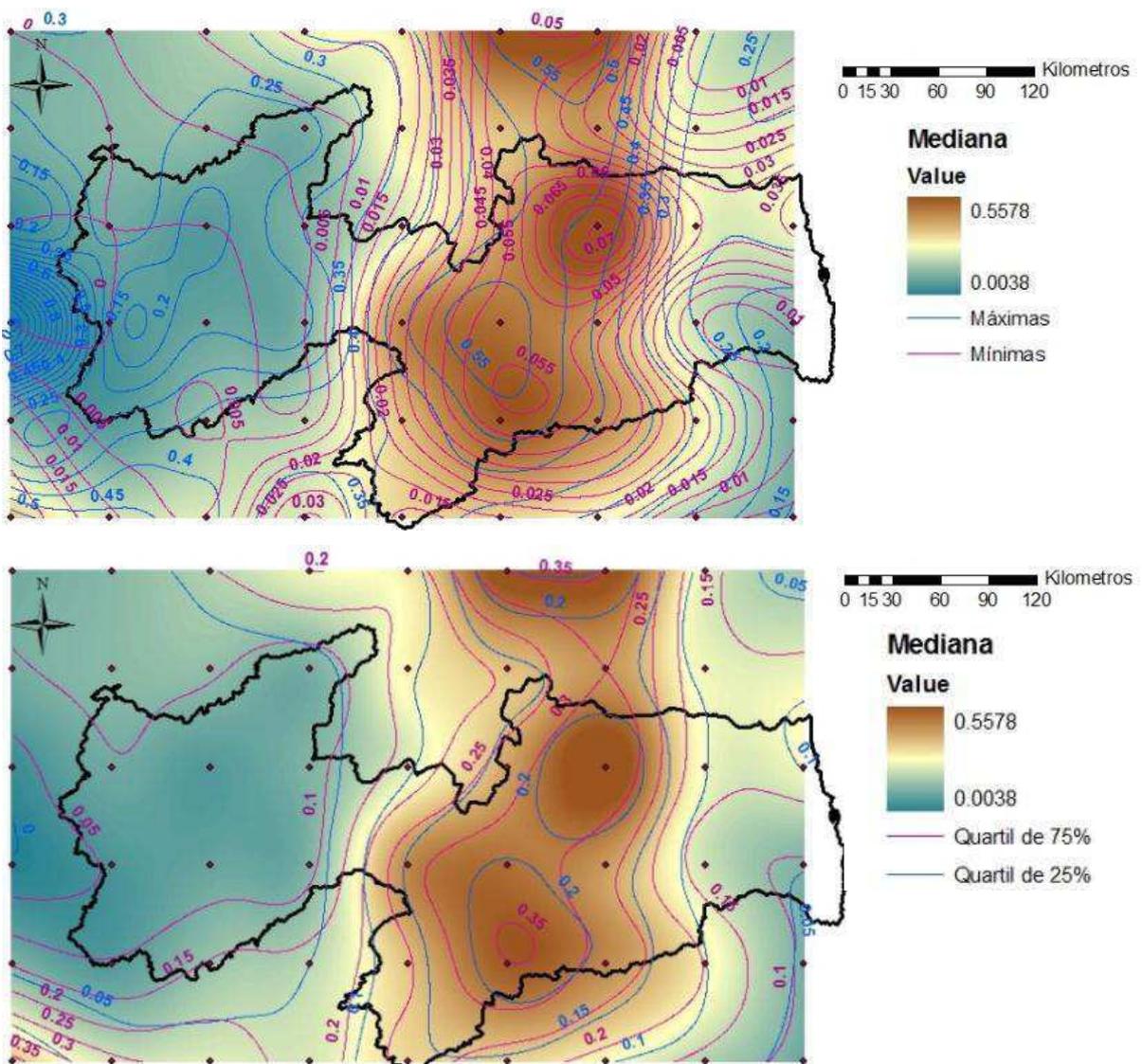


Figura 18 Vulnerabilidades futuras para 2100, para área de captação de 60m<sup>2</sup>.

Tabela 5 Variação nas vulnerabilidades atual e futura, para áreas de captação de 40m<sup>2</sup> e 60m<sup>2</sup>. Os valores se referem às médias, para cada descritor, no conjunto de 52 pontos na área de estudo.

Área de Captação	Cenário	Vulnerabilidade	
40 m <sup>2</sup>	Atual	Média	23,08%
		Mínima	10,17%
	2050	Quartil de 25%	22,39%
		Mediana	27,06%
		Quartil de 75%	33,00%
		Máxima	52,04%
2100	Mínima	4,22%	
	Quartil de 25%	14,06%	
	Mediana	22,40%	
	Quartil de 75%	32,57%	
	Máxima	56,59%	

Área de Captação	Cenário		Vulnerabilidade
60 m <sup>2</sup>	2050	Mínima	1,76%
		Quartil de 25%	8,84%
		Mediana	12,18%
		Quartil de 75%	17,51%
		Máxima	35,33%
	2100	Mínima	1,01%
		Quartil de 25%	3,65%
		Mediana	8,66%
		Quartil de 75%	16,64%
		Máxima	40,28%

Na Figura 19 nota-se que a vulnerabilidade atual comporta-se como a vulnerabilidade futura mediana para área de captação de 40m<sup>2</sup> e possui vulnerabilidades acima da de Quartil de 75% para área de 60m<sup>2</sup>, mostrando que a medida adaptativa utilizada também é eficiente na mitigação da vulnerabilidade para o horizonte de 2100.

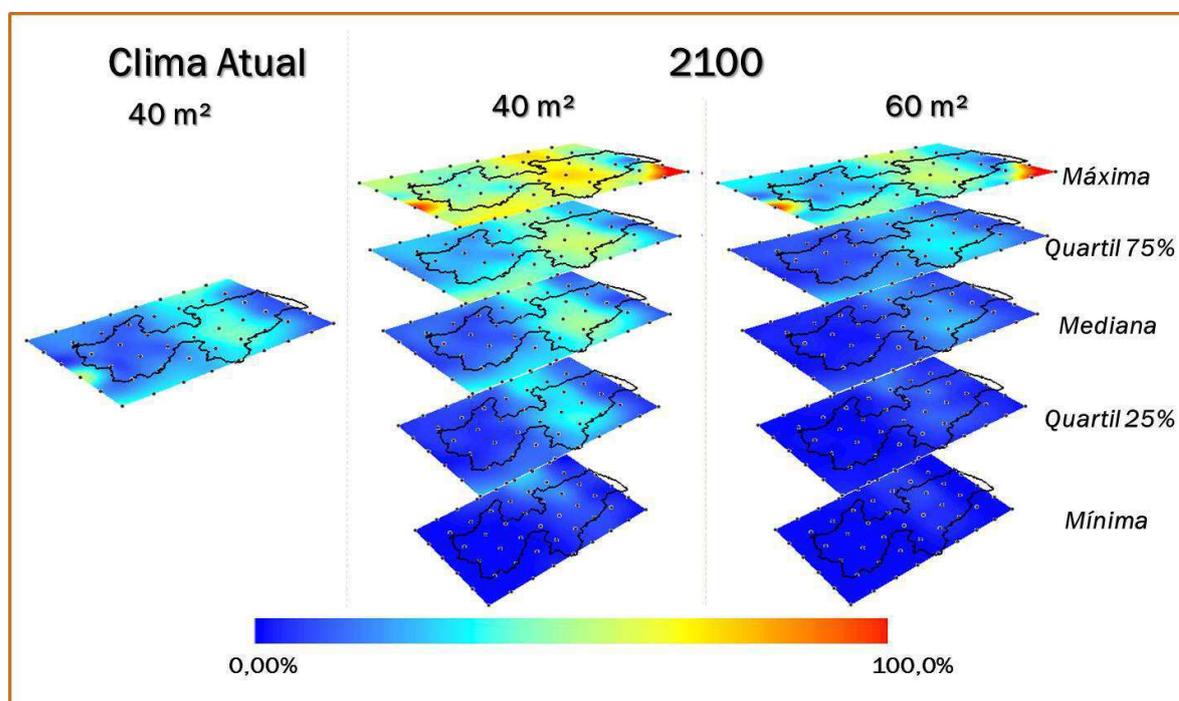


Figura 19 Comparação das vulnerabilidades para clima atual e futuro (2100) para áreas de captação de 40m<sup>2</sup> com vulnerabilidades futuras (2100) para área de captação de 60m<sup>2</sup>.

Na comparação entre as vulnerabilidades atual e futuras agregadas à medida adaptativa, percebe-se que, com exceção das vulnerabilidades futuras máximas, 2100 apresentará vulnerabilidades mais tênues em relação a 2050, reflexo do cenário de emissão de gases de efeito estufa utilizado (SRA1B) (Figura 20).

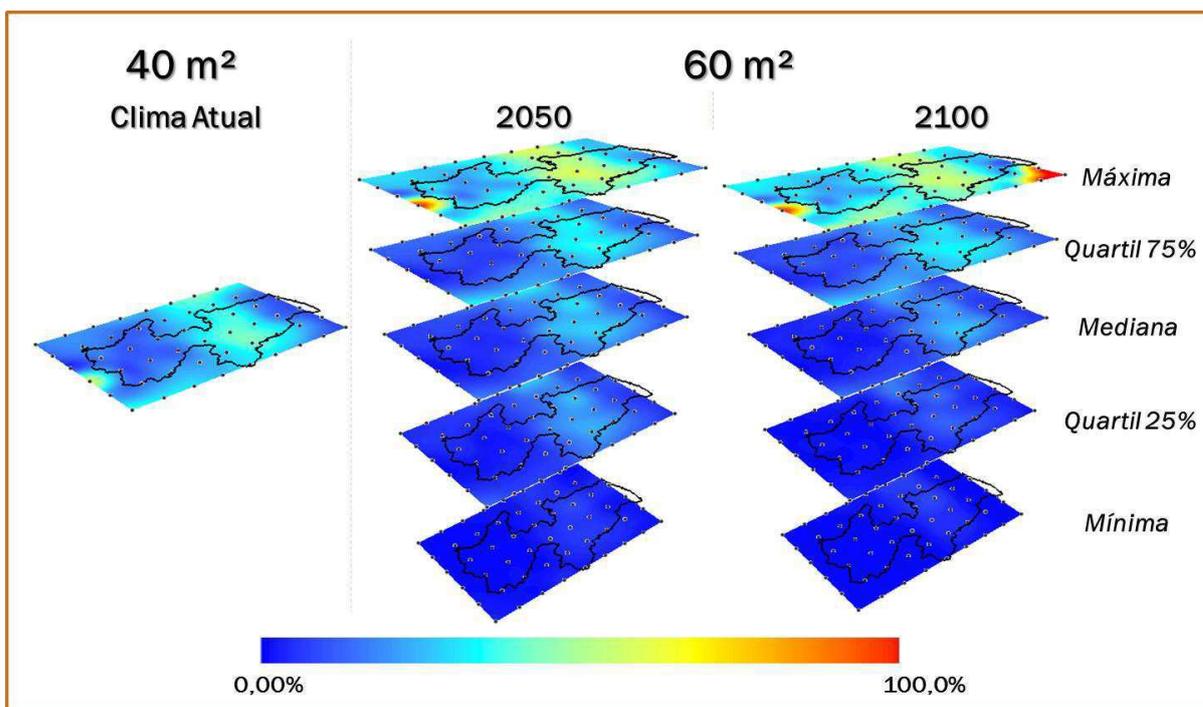


Figura 20 Comparação das vulnerabilidades para clima atual para áreas de captação de 40m<sup>2</sup> com vulnerabilidades futuras (2050 e 2100) para área de captação de 60m<sup>2</sup>.

Para os três municípios em ênfase, simulou-se para 2050, além do acréscimo de 20 m<sup>2</sup> à área de captação, um acréscimo intermediário de 10 m<sup>2</sup>, e desta vez também ao cenário atual de vulnerabilidade (Figura 21).

Os resultados mostram melhoria importante na vulnerabilidade de todos os sistemas, proporcionais à vulnerabilidade para o clima atual.

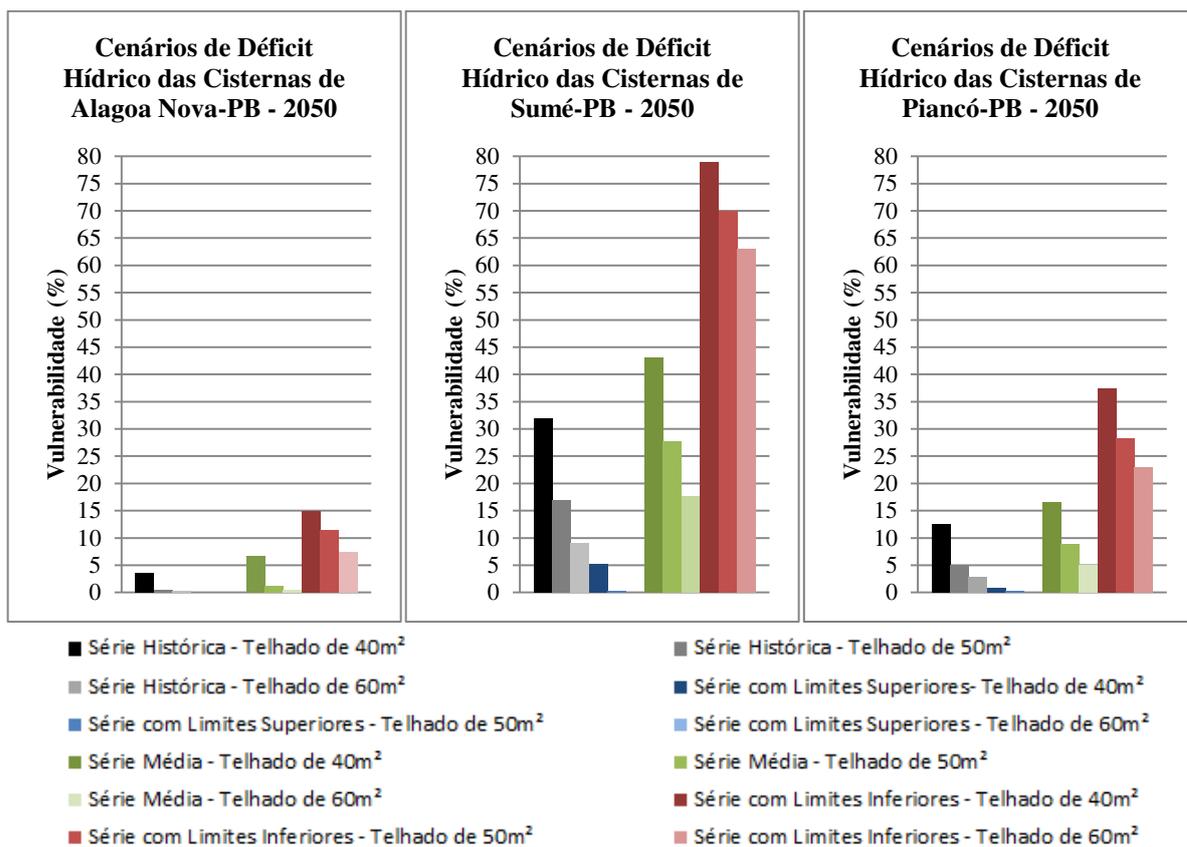


Figura 21 Cenários de vulnerabilidade (déficit hídrico) das cisternas considerando aumento na área de captação.

### 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No Semiárido Brasileiro, as secas são eventos recorrentes e algumas vezes consecutivos. Esta característica, por si só, é responsável pela vulnerabilidade atual.

Entende-se que um ano, sob clima atual, com pouca chuva ou com má distribuição da precipitação representa um ano com grande déficit hídrico, e que neste caso a cisterna padrão do P1MC já não é suficiente para suprir a demanda familiar.

Sob o clima atual as vulnerabilidades dos Sistemas de Captação de Água de Chuva são significativas e já pedem medidas de adaptação. Algumas áreas do Estado da Paraíba apresentam as vulnerabilidades atuais altas, superando os 50%.

Medidas de adaptação destes sistemas podem atenuar expressivamente as vulnerabilidades atuais e futuras. O aumento da área de captação, como alternativa de adaptação à baixa garantia de suprimento de água, mostrou-se relevante em todos os pontos analisados.

Porém, propõe-se a construção de Sistemas de Captação de Água de Chuva com tipologias distintas, que sejam eficientes na garantia hídrica para as diferentes características mesoregionais e de demanda familiar como, por exemplo, a construção de uma segunda cisterna em locais com grandes áreas de captação e ou com característica de grandes volumes pluviométricos.

Acredita-se que as vulnerabilidades atuais e futuras (ampliadas pelas mudanças climáticas) não estão sujeitas apenas aos fenômenos climáticos, embora estes sejam fatores determinantes. Sem dúvidas, a melhoria social e econômica, ofertada

pela gestão eficiente dos recursos hídricos que promova água em qualidade e quantidade mínimas suficientes, são estratégias de adaptação que atenderão à deficiência dos SCAC hoje e nos anos vindouros.

Recomenda-se que sejam realizadas análises de resiliência e outros índices e indicadores da sustentabilidade desses sistemas.

---

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASA. **Programa de Formação e Mobilização Social para a Convivência com o Semi-Árido: Um Milhão de Cisternas Rurais – P1MC**; sumário executivo. 2003.

ARNELL, N. W.. Factors controlling the effects of climate change on river flow regimes in a humid temperate environment. **Journal of Hydrology** 132, pp. 321-42. 1992

BRASIL- MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Nova Delimitação do Semi-Árido Brasileiro**. 2005.

BRAGA, A. C. F. M. ; BRAGA, C. F. C. ; GALVÃO, C. de O. . **Climate change and water management in a coastal tropical basin in north-eastern Brazil**. In: Planet under pressure - Towards new solutions, 2012, Londres., 2012.

BRITO, L.T.L.; MOURA, M.S.B.; GAMA, G.F.B.. (Org.). **Potencialidades da água de chuva no Semi-Árido brasileiro**. 1 ed. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2007.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Alagoa Nova, estado da Paraíba**. Recife, CPRM/PRODEEM, 2005a.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Piancó, estado da Paraíba**. Recife, CPRM/PRODEEM, 2005b.

DANTAS, M. S. ; GALVAO, C. O. ; NÓBREGA, R.L.B . **Vulnerabilidade de cisternas rurais sob clima atual e futuro: análise de três casos na Paraíba**. In: 8 Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva, 2012, Campina Grande. Aproveitamento da água de chuva em diferentes setores e escalas: Desafio da Gestão Integrada, 2012.

FERNANDES, R. O. ; NOBREGA, R. L. B. ; GALVÃO, C. de O. . **Impacto das mudanças climáticas globais na evaporação em um reservatório no semi-árido**. In: IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2008, Salvador/BA. Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2008.

FOWLER, H. J., BLENKINSOP, S., TEBALDI, C.. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. **International Journal of Climatology** 27:12, pp: 1547-1578, 2007,

GALVAO, C. O. ; OISHI, S. ; NÓBREGA, R.L.B ; DANTAS, M. S. . **Rainwater Catchment Systems under Climate Change: an Assessment of Brazilian and Japanese Cases**. In: 34th IAHR World Congress, 2011.

GELLENS, D., ROULIN, E.. Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios. **Journal of Hydrology** 210, pp. 242–258, 1998.

GHEYI, H. R. (Org.); PAZ, V. P. S. (Org.); MEDEIROS, S. S. (Org.) ; GALVAO, C. O. (Org.) . **Recursos Hídricos em Regiões Semiáridas: Estudos e Aplicações**. 1. ed. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2012. v. 1. 258p .

HAN, M. Y.; MUN, J. S. **Operational data of the Star City rainwater harvesting system and its role as a climate change adaptation and a social influence**. *Water Science & Technology*, v. 63, n 12, p. 2796–2801, 2011.

INCT-CLIMA. **INCT para Mudanças Climáticas, Relatório de Atividades 2009-2010**. São José dos Campos, 2010.

INCT-CLIMA. **Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas**. Disponível em: <<http://www.ccst.inpe.br/inct/>>, acessado em: 30 de outubro de 2011.

IPCC. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for policymakers**. 2007.

IPCC. **Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability**. In: MCCARTHY, J.J. **Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. p.1032.

IPCC-TGICA. **General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment**. Version 2. Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment, 66. 2007.

IPCC. **What is a GCM**. Disponível em: <[http://www.ipcc-data.org/ddc\\_gcm\\_guide.html](http://www.ipcc-data.org/ddc_gcm_guide.html)>, acesso em outubro de 2012.

JACOMINE, P. K. T. **Solos sob caatingas – Características e uso agrícola**. In: MOURA, M. S. B. ; GALVÍNCIO, J. D. ; BRITO, Luiza Teixeira de Lima ; SOUZA, Luciana Sandra Bastos de ; SÁ, Ivan Ighour Silva ; SILVA, Thieres George Freire da . **Clima e água de chuva no Semi-Árido**. In: BRITO, L.T.L.; MOURA, M.S.B.; GAMA, G.F.B.. (Org.). **Potencialidades da água de chuva no Semi-Árido brasileiro**. 1 ed. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2007, v. 1, p. 37-59.

KAHINDA, J. M; TAIGBENU, A. E.; BOROTO, R. J. **Domestic rainwater harvesting as an adaptation measure to climate change in South Africa**, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Volume 35, Issues 13–14, 2010, Pages 742-751, 2010.

LOAICIGA, H. A., MAIDMENT, D.R., VALDES, J.B. **Climate-change impacts in a regional Karst Aquifer, Texas, USA**. *Journal of Hydrology* 227, pp. 94, 2000.

LUCENA, A. **Proposta metodológica para avaliação da vulnerabilidade às mudanças climáticas globais no setor hidroelétrico**. Tese (Pós Graduação)– Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe); Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFJ). Rio de Janeiro, 2010.

MARENGO, J. A. **Possíveis impactos da mudança de clima no Nordeste**. *Revista Eletrônica de Jornalismo Científico*, 2007.

MERRITT, W. S., ALILA, Y., BARTON, M., TAYLOR, B., COHEN, S., & NEILSEN, D..Hydrologic response to scenarios of climate change in sub watersheds of the Okanagan basin, British Columbia. **Journal of Hydrology** 326, pp. 79–108, 2006.

MORRISON, J., QUICK, M. C., FOREMAN, M. G. G.. Climate change in the Fraser Rivers watershed: flow and temperature projections. **Journal of Hydrology** 263, pp. 44, 2002.

NASIR, K. A.; OMAR, M. F. B.; OMAR, E. H. B. **Effectiveness of rainwater harvesting system at office building in coping with climate change**. Anais da 6ª Conferência Internacional sobre Sistemas de Catapção de Água de Chuva. Kuala Lumpur, Malásia, 2009.

NOBRE, P.; MELO, A. B. C.. **Variabilidade climática intrasazonal sobre o Nordeste do Brasil em 1998-2000**. Climanálise, Brasil, 2001.

PANDEY, D. N.; GUPTA, A. K.; ANDERSON, D. M. **Rainwater harvesting as an adaptation to climate change**. Current Science. Vol. 85, n. 1, jul 2003

SEGHIDRO. **Documentação Técnica da Aplicação Mudanças Climáticas**. Campina Grande-PB. 2009

SILVA, V. de P. R. da, On climate variability in Northeast of Brazil, **Journal of Arid Environments**, Volume 58, Issue 4, September 2004, Pages 575-596, ISSN 0140-1963, 10.1016/j.jaridenv.2003.12.002.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; Campos, Y.M.L.. Sazonalidade Da Precipitação Sobre O Nordeste Setentrional Brasileiro Nas Simulações Do Ipccl-Ar4. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, p. 125-134, 2012.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; Campos, Y.M.L.. Avaliação de Desempenho dos Modelos de Mudança Climática do IPCC-AR4 Quanto a Sazonalidade e os Padrões de Variabilidade Interanual da Precipitação Sobre o Nordeste do Brasil, Bacia do Prata e Amazônia. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.18,177-194, 2013.

WARRICK, R.A.; URICH, P.B. **Using SimCLIM to assess the risks of climate variability and change to decentralised water harvesting systems**, Anais da 6ª Conferência Internacional sobre Sistemas de Captação de Água de Chuva. Kuala Lumpur, Malásia, 2009.