

**Ministério da Saúde**  
**Fundação Oswaldo Cruz**  
**Instituto René Rachou**  
**Programa de Pós-graduação em Saúde Coletiva**

**A VULNERABILIDADE HUMANA À MUDANÇA CLIMÁTICA NA REGIÃO  
NORTE BRASILEIRA: UM ESTUDO DA POPULAÇÃO DO AMAZONAS**

por

Júlia Alves Menezes

Belo Horizonte  
2017

**TESE DSC - IRR**

**J. A. MENEZES 2017**

**JÚLIA ALVES MENEZES**

**A VULNERABILIDADE HUMANA À MUDANÇA CLIMÁTICA NA REGIÃO  
NORTE BRASILEIRA: UM ESTUDO DA POPULAÇÃO DO AMAZONAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saúde Coletiva do Instituto René Rachou, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Saúde Coletiva - área de concentração Epidemiologia

Orientação: Dr. Ulisses Eugênio Cavalcanti  
Confalonieri  
Coorientação: Dra. Carina Margonari

Belo Horizonte

2017

Catálogo-na-fonte  
Rede de Bibliotecas da FIOCRUZ  
Biblioteca do IRR  
Segemar Oliveira Magalhães CRB/6 1975

M541v Menezes, Júlia Alves.  
2017

A vulnerabilidade humana à mudança climática na região Norte brasileira: um estudo da população do Amazonas / Júlia Alves Menezes. – Belo Horizonte, 2017.

XXIII, 204 f.: il.; 210 x 297mm.

Bibliografia: f.: 198 - 223

Tese (Doutorado) – Tese para obtenção do título de Doutor(a) em Saúde Coletiva pelo Programa de Pós - Graduação em Saúde Coletiva do Instituto René Rachou. Área de concentração: Epidemiologia

1. Mudança Climática 2. Desastres/prevenção & controle 3. Riscos Ambientais I. Título. II. Confalonieri, Ulisses Eugenio Cavalcanti (Orientação). III. Margonari, Carina (Coorientação)

CDD – 22. ed. – 577.22

**Júlia Alves Menezes**

**A VULNERABILIDADE HUMANA À MUDANÇA CLIMÁTICA NA REGIÃO  
NORTE BRASILEIRA: UM ESTUDO DA POPULAÇÃO DO AMAZONAS**

**Tese apresentada ao Programa de  
Pósgraduação em Saúde Coletiva do  
Instituto René Rachou, como requisito  
parcial à obtenção do título de Doutor em  
Saúde Coletiva - área de concentração  
Epidemiologia**

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Ulisses Eugênio Cavalcanti Confalonieri (IRR/Fiocruz) Presidente

Prof. Dr. Alisson Flávio Barberi (UFMG) Titular

Prof. Dr. Claudio Fabian Szlafsztein (UFPA) Titular

Profa. Dra. Ana Paula Madureira (UFSJ) Titular

Profa. Dra. Martha Macedo de Lima Barata (IOC/Fiocruz) Titular

Profa. Dra. Célia Maria Ferreira Gontijo (IRR/Fiocruz) Suplente

Tese defendida e aprovada em Belo Horizonte, 17 / 08 / 2017

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus pela força e iluminação.

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais Zilá e Fernando, e à minha tia Lourdes, por todo o apoio e compreensão.

Ao Mário Henrique pela companheirismo incondicional.

Aos meus queridos orientadores. Ao professor Ulisses Confalonieri por todo o aprendizado, sabedoria e generosidade. À Dra. Carina Margonari por sempre estar presente, pela amizade e pelas valiosas sugestões.

Ao GETESA e seus integrantes por terem me acolhido nessa jornada.

De maneira especial, agradeço aos amigos do GETESA Aline, Isabela, Poliana, Priscila, Regis e Rhavena por viverem comigo todos os momentos desse projeto.

Aos integrantes do projeto de Vulnerabilidade ao Clima, do qual se originou essa tese, e que muito contribuíram para a construção desse trabalho.

Aos órgãos públicos do estado do Amazonas que auxiliaram nas articulações e no desenvolvimento do projeto, especialmente à Secretaria de Estado de Planejamento, Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Instituto Leonidas e Maria Deane, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

Ao Ministério do Meio Ambiente pelo financiamento deste trabalho e ao Instituto René Rachou pelas instalações.

## RESUMO

A vulnerabilidade, entendida como a propensão a ser adversamente afetado, tem ganhado importância no contexto das mudanças climáticas ao permitir compreender o que torna populações e territórios mais susceptíveis aos impactos do clima. Condições de vulnerabilidade podem variar a depender das características de cada local estudado – sociais, ambientais, de infraestrutura, políticas públicas, dentre outras. O presente estudo teve o objetivo de avaliar os aspectos que tornam os municípios do estado do Amazonas, Brasil, vulneráveis à mudança do clima no contexto da maior floresta tropical do mundo e quais regiões do estado são as mais susceptíveis. Para tanto, um Índice de Vulnerabilidade Municipal foi desenvolvido, o qual associou características socioambientais do momento presente com cenários de clima futuros para identificar as áreas mais vulneráveis. A metodologia se baseou na atribuição de notas indicativas de maior (4) ou menor vulnerabilidade (0) a cada variável. Essas foram sucessivamente agregadas através de média aritmética e padronização, gerando índices e sub-índices com valores que variaram numa escala entre 0 (menos vulnerável) e 1 (mais vulnerável). Os resultados mostraram que os sub-índices relacionados à Pobreza, Doenças Infecciosas, Desastres, Organização Sociopolítica e Estrutura Socioeconômica foram os fatores que mais influenciaram a vulnerabilidade atual dos municípios do Amazonas, sendo as áreas sul, norte e leste as mais vulneráveis do estado. Quando a vulnerabilidade atual foi associada com as projeções de clima futuro, as regiões mais vulneráveis foram a norte, nordeste, extremo sul e sudoeste. Sob o ponto de vista socioambiental e climático, essas regiões são as que devem receber recursos e incentivos prioritários para reduzir suas vulnerabilidades e se preparar para lidar com os impactos adversos do clima. Acredita-se que a manutenção das condições socioambientais observadas no presente estudo pode representar, na perspectiva de alteração climática, um agravamento da desigualdade social e da miséria, além de elevar os custos e perdas relacionadas aos desastres e ao sistema de saúde. Espera-se que o mapeamento dos índices gerados possa contribuir, de maneira pioneira, para a orientação das políticas públicas com foco na redução da vulnerabilidade da população amazonense, pois indicam as ações que, de fato, podem ter efetividade para melhorar as condições de vida e saúde da população local.

**Palavras-chave:** Vulnerabilidade; Mudança do Clima; Amazônia; Municípios; Indicadores.

## ABSTRACT

Vulnerability, understood as the propensity to be adversely affected, has attained importance in the context of climate change by helping to understand what makes populations and territories predisposed to its impacts. Conditions of vulnerability may vary depending on the characteristics of each territory studied - social, environmental, infrastructural, public policies, among others. Thus, the present study aimed to evaluate what makes the municipalities of the state of Amazonas, Brazil, vulnerable to climate change in the context of the largest tropical forest in the world, and which regions of the State are the most susceptible. Thus, a Municipal Vulnerability Index was developed, which associated current socio-environmental characteristics of the with future climate scenarios to identify the most vulnerable areas. The methodology was based on the assignment of scores indicating greater (4) or lesser vulnerability (0) to each variable. These were successively aggregated through arithmetic mean and standardization, generating indexes and sub-indices with values ranging from 0 (less vulnerable) to 1 (more vulnerable). The results showed that the sub-indices related to poverty, infectious diseases, disasters, cociopolitical organization, and socioeconomic structure were the factors that influenced the most the current vulnerability of the municipalities of Amazonas, with the southern, northern and eastern areas being the most vulnerable in the state. When the current vulnerability was associated with future climate projections, the most vulnerable regions were north, northeast, south, and southwest. From a socio-environmental and climatic point of view, priority should be given to these regions in terms of resources and incentives aiming at reducing their vulnerabilities and prepare them to deal with the adverse impacts of climate. The maintenance of the socio-environmental conditions observed in the present study may represent, in the perspective of the climate change, a worsening of the social inequality and poverty, besides raising the costs and losses - whether economic or human - related to disasters and to the health system. It is expected that mapping the indeces generated in the present study may contribute, in a pioneering way, to the orientation of the public policies focusing on the reduction of the vulnerability of the Amazonas population. These indexes highlight the actions that may, in fact, be more effective to improve the health and living conditions of the local population.

**Keywords:** Vulnerability; Climate Change; Amazon; Municipalities; Indicators.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Ciclo global do Carbono. As emissões e fixações de CO<sub>2</sub> são mostradas em gigatoneladas para as atividades antropogênicas (vermelho), para a vegetação e superfície terrestre, e para os oceanos (preto). Fonte: adaptado de IPCC AR4 - Climate Change 2007: Working Group I – The Physical Science Basis..... 30
- Figura 2.** A- Total anual das emissões de gases do efeito estufa antropogênicos em gigatons/ano para o período de 1970 a 2010, por gases: CO<sub>2</sub> da queima de combustíveis fósseis e processos industriais, CO<sub>2</sub> de florestas e outros usos da terra, metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e gases fluorados abarcados pelo Protocolo de Kyoto. B- Total das emissões de gases antropogênicos do efeito estufa em gigatons/ano de setores econômicos em 2010. Fonte: adaptado de IPCC, 2014. .... 31
- Figura 3.** Aumento na concentração de gases do efeito estufa considerados estáveis, entre os anos de 1750 e 2000. A: dióxido de carbono; B: metano; C: óxido nitroso; D: clorofluorcarbono-11. Fonte: adaptado de VITOUSEK (1992). .... 32
- Figura 4.** Mudanças qualitativas projetadas para o final do século XXI sob o cenário de emissão A2 do IPCC AR4: o painel superior mostra as mudanças esperadas na precipitação e o painel inferior as mudanças esperadas na temperatura. O tamanho das setas indica a magnitude das mudanças projetadas. Fonte: SOLMAN (2013). .... 36
- Figura 5.** Resumo das projeções de mudança do clima para o Brasil e suas grandes regiões com base nos resultados do Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM). Fonte: PIVETTA (2013). .... 39
- Figura 6.** Mecanismos de ação da mudança do clima na saúde. Fonte: IPCC (2007). .... 41
- Figura 7.** Tradições de pesquisa em vulnerabilidade e sua evolução. Fonte: FEITOSA; MONTEIRO (2012). .... 45
- Figura 8.** Microrregiões do Amazonas e a localização da capital, Manaus, mostrada no polígono rachurado. .... 53
- Figura 9.** Municípios do estado do Amazonas. .... 55
- Figura 10.** Modelo conceitual ilustrando a relação entre a vulnerabilidade e seus componentes. O círculo representa o município onde as muitas condições de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa determinam o perfil de vulnerabilidade da população. As caixas exemplificam algumas dessas condições consideradas críticas para cada componente: a caixa verde está relacionada à exposição, a amarela à sensibilidade e a laranja à capacidade adaptativa. O risco climático está representado pela mudança climática futura. Adaptado: ALLEN CONSULTING GROUP (2005). .... 57
- Figura 11.** Diagrama metodológico mostrando como os índices municipais desenvolvidos foram organizados para gerar o Índice de Vulnerabilidade Municipal considerando ambos os cenários de emissão otimista (RCP 4.5) e pessimista (RCP 8.5). .... 63



## LISTA DE MAPAS

- Mapa 1.** Distribuição dos valores municipais do Índice de Cobertura Vegetal e Desmatamento (ICVD) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação de exposição relacionada ao ICVD – do bege, menos exposto, até o vermelho, mais exposto.... 96
- Mapa 2.** Distribuição dos valores municipais do Índice de Desastres Naturais (IDN) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação de exposição relacionada ao IDN – do bege, menos exposto, até o vermelho, mais exposto. .... 98
- Mapa 3.** Distribuição dos valores municipais do Índice de Desastres Naturais (IDN) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação de exposição relacionada ao IDN – do bege, menos exposto, até o vermelho, mais exposto. .... 100
- Mapa 4.** Distribuição dos valores municipais do Índice de Doenças Associadas ao Clima (IDAC) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação da sensibilidade relacionada ao IDAC – do bege, menos sensível, até o vermelho, mais sensível. .... 106
- Mapa 5.** Representação espacial dos índices das doenças que compuseram o Índice de Doenças Associadas ao clima (IDAC) para o Amazonas. A – Índice de Animais Peçonhentos; B – Índice de Dengue; C – Índice de Leishmaniose Tegumentar; D – Índice de Malária. As cores representam a gradação da sensibilidade relacionada às doenças – do bege, menos sensível, até o vermelho, mais sensível. .... 109
- Mapa 6.** Distribuição dos valores municipais do Índice de Pobreza (IPo) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação da sensibilidade relacionada ao IPo – do bege, menos sensível, até o vermelho, mais sensível. .... 110
- Mapa 7.** Distribuição dos valores municipais do Índice de Sensibilidade Sociodemográfica (ISS) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação da sensibilidade relacionada ao ISS – do bege, menos sensível, até o marrom, mais sensível. .... 113
- Mapa 8.** Distribuição dos valores municipais do Índice de Sensibilidade (IS) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação da sensibilidade do IS – do bege, menos sensível, até o vermelho, mais sensível. .... 116
- Mapa 9.** Distribuição dos valores municipais do Índice de Estruturas Socioeconômicas (IES) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação da capacidade adaptativa a partir do raciocínio da vulnerabilidade para o IES – do bege, mais adaptado/menos vulnerável, até o vermelho, menos adaptado/mais vulnerável. .... 121
- Mapa 10.** Distribuição dos valores municipais do Índice de Instituições e Infraestrutura para Adaptação (IADAP) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação da capacidade adaptativa a partir do raciocínio da vulnerabilidade para o IADAP – do bege, mais adaptado/menos vulnerável, até o vermelho, menos adaptado/mais vulnerável. .... 122

<b>Mapa 11.</b> Distribuição dos valores municipais do Índice de Organização Sociopolítica (IOS) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação da capacidade adaptativa a partir do raciocínio da vulnerabilidade para o IOS – do bege, mais adaptado/menos vulnerável, até o vermelho, menos adaptado/mais vulnerável. ....	125
<b>Mapa 12.</b> Distribuição dos valores municipais do Índice de Capacidade Adaptativa (ICA) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação da capacidade adaptativa a partir do raciocínio da vulnerabilidade – do bege, mais adaptado/menos vulnerável, até o vermelho, menos adaptado/mais vulnerável.....	126
<b>Mapa 13.</b> Distribuição dos valores municipais do Índice Vulnerabilidade (IV) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação da vulnerabilidade para os municípios amazonenses – do bege, menos vulnerável, até o vermelho, mais vulnerável. ....	129
<b>Mapa 14.</b> Distribuição dos valores municipais do Índice de Cenário Climático 4.5 (ICC 4.5) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação da vulnerabilidade no aspecto climático para os municípios amazonenses – do bege, menos vulnerável, até o vermelho, mais vulnerável. ....	134
<b>Mapa 15.</b> Distribuição dos valores municipais do Índice de Cenário Climático 8.5 (ICC 8.5) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação da vulnerabilidade no aspecto climático para os municípios amazonenses – do bege, menos vulnerável, até o vermelho, mais vulnerável. ....	139
<b>Mapa 16.</b> Distribuição dos valores municipais do Índice Municipal de Vulnerabilidade 4.5 (IMV 4.5) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação da vulnerabilidade municipal para os municípios amazonenses – do bege, menos vulnerável, até o vermelho, mais vulnerável.....	145
<b>Mapa 17.</b> Distribuição dos valores municipais do Índice Municipal de Vulnerabilidade 8.5 (IMV 8.5) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação da vulnerabilidade municipal para os municípios amazonenses – do bege, menos vulnerável, até o vermelho, mais vulnerável.....	147

## LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1.** Valores médios do Índice de Cobertura Vegetal e Desmatamento (ICVD) e de seus componentes, desmatamento e cobertura vegetal, para as microrregiões do estado do Amazonas. **B** – Valores do Índice de Cobertura Vegetal e Desmatamento (ICVD) e de seus componentes, desmatamento e cobertura vegetal, para os municípios mais expostos do estado do Amazonas. ....97
- Gráfico 2. A** - Valores médios do Índice de Desastres Naturais (IDN) e de seus componentes, Índice de Susceptibilidade a Desastres Naturais (ISDN) e Índice de Ocorrência de Desastres Naturais (IODN), para as microrregiões do estado do Amazonas. **B** – Valores do Índice de Desastres Naturais (IDN) e de seus componentes, Índice de Susceptibilidade a Desastres Naturais (ISDN) e Índice de Ocorrência de Desastres Naturais (IODN), para os municípios mais expostos do estado do Amazonas.....99
- Gráfico 3. A** - Valores médios do Índice de Exposição (IE) e de seus componentes, Índice de Cobertura Vegetal e Desmatamento (ICVD), do Índice de Desastres Naturais (IDN), para as microrregiões do estado do Amazonas. **B** – Valores do Índice de Exposição (IE) e de seus componentes, Índice de Cobertura Vegetal e Desmatamento (ICVD), do Índice de Desastres Naturais (IDN), para os municípios mais expostos do estado do Amazonas. ....101
- Gráfico 4.** Valores médios do Índice de Doenças Associadas ao Clima (IDAC) e de seus componentes, Leishmaniose Tegumentar, Malária, Animais Peçonhentos e Dengue, para as microrregiões do estado do Amazonas..... 107
- Gráfico 5.** Gráfico radar mostrando os valores do Índice de Doenças Associadas ao Clima (IDAC) e de seus componentes, Leishmaniose Tegumentar, Malária, Animais Peçonhentos e Dengue, para os municípios mais sensíveis do estado do Amazonas – A – Manaus; B – Rio Preto da Eva; C – Lábrea; D – São Gabriel da Cachoeira. .... 107
- Gráfico 6.** Valores médios do Índice de Pobreza (IPo) e de seus componentes – probabilidade morrer até os 40 anos, analfabetismo acima dos 25 anos, domicílios com saneamento inadequado, mortalidade infantil até 5 anos e proporção da população com renda até ½ salário mínimo, para as microrregiões do estado do Amazonas ..... 111
- Gráfico 7.** Gráficos Radar mostrando os valores do Índice de Pobreza (IPo) e de seus componentes – probabilidade morrer até os 40 anos, analfabetismo acima dos 25 anos, domicílios com saneamento inadequado, mortalidade infantil até 5 anos e proporção da população com renda até ½ salário mínimo, para os municípios mais sensíveis do estado do Amazonas – A – Barcelos; B – Fonte Boa; C – Lábrea; D – Tapauá; E – Envira; F – Pauini; G – Uarini; H – Atalaia do Norte; I – Ipixuna; J – Itamarati; K – Santa Isabel do Rio Negro; L – Juruá. .... 112
- Gráfico 8. A** - Valores médios do Índice de Sensibilidade Sociodemográfica (ISS) e de seus componentes, ISS presente e ISS futuro, para as microrregiões do estado do Amazonas. **B** –

Valores do Índice de Sensibilidade Sociodemográfica Presente (ISS presente) e de seus componentes, mulheres chefes de família, chefes de família jovens, população infantil e idosa, população deficiente e população ribeirinha, para as microrregiões do Estado.....	114
<b>Gráfico 9.</b> Gráfico radar mostrando os valores dos componentes do Índice de Sensibilidade Sociodemográfica (ISS) presente – mulheres chefes de família, chefes de família jovens, população infantil e idosa, população deficiente e população ribeirinha, para o município de Iranduba, o mais sensível do estado do Amazonas - Iranduba.....	115
<b>Gráfico 10.</b> Gráfico radar mostrando a distribuição dos valores municipais dos componentes do Índice de Sensibilidade (IS) para os municípios mais sensíveis do estado do Amazonas – A - São Gabriel da Cachoeira; B – Lábrea.....	116
<b>Gráfico 11.</b> Valores médios do Índice de Sensibilidade (IS) e de seus componentes – Índice de Doenças Associadas ao Clima (IDAC), Índice de Pobreza (IPo) e Índice de Sensibilidade Sociodemográfica (ISS) – para as microrregiões do estado do Amazonas.....	117
<b>Gráfico 12.</b> Valores médios do Índice de Estruturas Socioeconômicas (IES) para as microrregiões do estado do Amazonas.....	121
<b>Gráfico 13.</b> Valores médios do Índice de Instituições e Infraestrutura para Adaptação (IADAP) para as microrregiões do estado do Amazonas.....	123
<b>Gráfico 14.</b> Distribuição dos valores do Índice de Instituições e Infraestrutura para Adaptação (IADAP) para os municípios menos adaptados do estado do Amazonas – A – Itapiranga; B – Humaitá; C – Nhamundá; D – Novo Airão; E – Careiro da Várzea; F – Santa Isabel do Rio Negro.....	124
<b>Gráfico 15.</b> Valores médios do Índice de Organização Sociopolítica (IOS) para as microrregiões do estado do Amazonas.....	126
<b>Gráfico 16.</b> Valores médios do Índice de Capacidade Adaptativa (ICA) e seus componentes para as microrregiões do estado do Amazonas.....	127
<b>Gráfico 17.</b> Gráficos radar mostrando a distribuição dos valores dos componentes do Índice de Capacidade Adaptativa (ICA) para os municípios menos adaptados do estado do Amazonas – A – São Gabriel da Cachoeira; B - Barcelos; C - Beruri; D - Santa Isabel do Rio Negro.....	128
<b>Gráfico 18.</b> Valores médios do Índice de Vulnerabilidade (IV) e seus componentes para as microrregiões do estado do Amazonas.....	130
<b>Gráfico 19.</b> Representação radar dos valores dos componentes do Índice de Vulnerabilidade (IV) para os municípios mais vulneráveis do estado do Amazonas – A - Boca do Acre; B - Lábrea; C - Careiro da Várzea. IE – Índice de Exposição; IS – Índice de Sensibilidade; ICA – Índice de Capacidade Adaptativa.....	130

**Gráfico 20. A** – Valores médios do Índice de Cenário Climático 4.5 (ICC 4.5) e de seus componentes, Índice de Temperatura (ITemp) e Índice de Precipitação (IPrec), para as microrregiões do estado do Amazonas. **B** – Valores do Índice de Cenário Climático 4.5 (ICC 4.5) e de seus componentes, Índice de Temperatura (ITemp) e Índice de Precipitação (IPrec), para os municípios mais vulneráveis climaticamente do estado do Amazonas. .... 138

**Gráfico 21. A** – Valores médios do Índice de Cenário Climático 8.5 (ICC 8.5) e de seus componentes, Índice de Temperatura (ITemp) e Índice de Precipitação (IPrec), para as microrregiões do estado do Amazonas. **B** – Valores do Índice de Cenário Climático 8.5 (ICC 8.5) e de seus componentes, Índice de Temperatura (ITemp) e Índice de Precipitação (IPrec), para os municípios mais vulneráveis climaticamente do estado do Amazonas. .... 142

**Gráfico 22. A** – Valores médios do Índice de Vulnerabilidade Municipal 4.5 (IMV 4.5) e de seus componentes, Índice de Vulnerabilidade (IV) e Índice de Cenário Climático 4.5 (ICC 4.5), para as microrregiões do estado do Amazonas. **B** – Valores do Índice de Vulnerabilidade Municipal 4.5 (IMV 4.5) e de seus componentes, Índice de Vulnerabilidade (IV) e Índice de Cenário Climático 4.5 (ICC 4.5), para os municípios mais vulneráveis do estado do Amazonas. .... 146

**Gráfico 23. A** – Valores médios do Índice de Vulnerabilidade Municipal 8.5 (IMV 8.5) e de seus componentes, Índice de Vulnerabilidade (IV) e Índice de Cenário Climático 8.5 (ICC 8.5), para as microrregiões do estado do Amazonas. **B** – Valores do Índice de Vulnerabilidade Municipal 8.5 (IMV 8.5) e de seus componentes, Índice de Vulnerabilidade (IV) e Índice de Cenário Climático 8.5 (ICC 8.5), para os municípios mais vulneráveis do estado do Amazonas. .... 149

## LISTA DE QUADROS

- Quadro 1.** Índices que compõem o Índice Municipal de vulnerabilidade, seu cálculo, breve descrição e sua relação com a vulnerabilidade. .... 66
- Quadro 2.** Método de atribuição das notas às variáveis presentes no item “Gerenciamento de Risco” ..... 85
- Quadro 3.** Metodologia de atribuição de notas ao item “instituições de segurança” ..... 86

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Notas e distribuição dos percentuais de desmatamento acumulado e cobertura vegetal nativa para os municípios do Amazonas.....	72
<b>Tabela 2.</b> Notas e distribuição do percentual de pessoas em risco por município e do número médio de dias consecutivos sem chuva na série histórica para o estado do Amazonas. ....	73
<b>Tabela 3.</b> Notas e distribuição da proporção de eventos no município e da proporção de óbitos no município para o estado do Amazonas. ....	74
<b>Tabela 4.</b> Percentis utilizados para atribuir as notas, com seus respectivos intervalos, para as doenças sensíveis ao clima .....	78
<b>Tabela 5.</b> Intervalos dos percentis utilizados para atribuir as notas aos indicadores de renda, probabilidade de morrer antes dos 40 anos, analfabetismo, saneamento e mortalidade infantil. ....	80
<b>Tabela 6.</b> Intervalos dos percentis utilizados para atribuir as notas aos indicadores chefes de família, mulheres chefes de família, população infantil e idosa, população deficiente e população ribeirinha. ....	81
<b>Tabela 7.</b> Intervalos dos percentis utilizados para atribuir as notas aos indicadores de projeção de crianças e de idosos para o ano de 2040. ....	82
<b>Tabela 8.</b> Intervalos dos percentis utilizados para atribuir as notas ao Índice de Estruturas Socioeconômicas (IES).....	84
<b>Tabela 9.</b> Intervalos dos percentis utilizados para atribuir as notas aos indicadores de saúde, leitos e cobertura da atenção básica.....	87
<b>Tabela 10.</b> Intervalos dos percentis utilizados para atribuir as notas ao indicador de conselhos e consórcios .....	88
<b>Tabela 11.</b> Intervalos dos percentis utilizados para atribuir as notas aos indicadores de temperatura e precipitação.....	91
<b>Tabela 12.</b> Valores municipais dos índices de susceptibilidade a desastres naturais (ISDN), de ocorrência de desastres naturais (IODN), de desastres naturais (IDN), indicador de desmatamento (IDesm), indicador de cobertura vegetal (ICob), índice de cobertura vegetal e desmatamento (ICVD) e índice de exposição (IE).....	93
<b>Tabela 13.</b> Valores, por microrregião, dos índices de susceptibilidade a desastres naturais (ISDN), de ocorrência de desastres naturais (IODN), de desastres naturais (IDN), do indicador	

de desmatamento (IDesm), indicador de cobertura vegetal (ICob), índice de cobertura vegetal (ICV) e índice de exposição (IE). ..... 95

**Tabela 14.** Valores municipais do Índice de Sensibilidade (IS) e seus respectivos componentes. Índice de Doenças Associadas ao Clima (IDAC) e seus indicadores - Leishmaniose Tegumentar (ILTA), Malária (IMAL), Acidentes por Animais Peçonhentos (IAP) e Dengue. Índice de Pobreza (IPo) e seus indicadores – Probabilidade de Sobrevivência (I40), Analfabetismo (IAnf), Saneamento (ISan), Mortalidade (IMort) e Renda (IRend). Índice de Sensibilidade Sociodemográfica (ISS) e seus sub-índices – Sensibilidade Futura (ISS Futuro) e Sensibilidade Presente (ISS Presente), com os respectivos indicadores deste último – Mulheres Chefes de Família (IMul), Chefes de Família Jovens (IJov), Mortalidade Infantil (IInf), População Idosa (IIdos), População Deficiente (IDef) e População Ribeirinha (IRib). ..... 102

**Tabela 15.** Valores, por microrregião, do Índice de Sensibilidade (IS) e seus respectivos componentes. Índice de Doenças Associadas ao Clima (IDAC) e seus indicadores - Leishmaniose Tegumentar (ILTA), Malária (IMAL), Acidentes por Animais Peçonhentos (IAP) e Dengue. Índice de Pobreza (IPo) e seus indicadores – Probabilidade de Sobrevivência (I40), Analfabetismo (IAnf), Saneamento (ISan), Mortalidade (IMort) e Renda (IRend). Índice de Sensibilidade Sociodemográfica (ISS) e seus sub-índices – Sensibilidade Futura (ISS Futuro) e Sensibilidade Presente (ISS Presente), com os respectivos indicadores deste último – Mulheres Chefes de Família (IMul), Chefes de Família Jovens (IJov), Mortalidade Infantil (IInf), População Idosa (IIdos), População Deficiente (IDef) e População Ribeirinha (IRib). ..... 105

**Tabela 16.** Valores municipais do Índice de Capacidade Adaptativa (ICA) e seus sub-índices. Índice de Estruturas Socioeconômicas (IES), Índice de Instituições, Infraestrutura e Serviços para Adaptação (IADAP) com seus respectivos indicadores – saúde (ISaúde), segurança (ISeg) e gerenciamento (IGer); e Índice de Organização Sociopolítica (IOS). ..... 118

**Tabela 17.** Valores, por microrregião, do Índice de Capacidade Adaptativa (ICA) e seus sub-índices. Índice de Estruturas Socioeconômicas (IES), Índice de Instituições, Infraestrutura e Serviços para Adaptação (IADAP) com seus respectivos indicadores – saúde (ISaúde), segurança (ISeg) e gerenciamento (IGer); e Índice de Organização Sociopolítica (IOS). ..... 120

**Tabela 18.** Valores municipais do Índice de Vulnerabilidade (IV) e de seus respectivos sub-índices – Índice de Exposição (IE), Índice de Sensibilidade (IS) e Índice de Capacidade Adaptativa (ICA). ..... 131

**Tabela 19.** Valores médios, por microrregião, do Índice de Vulnerabilidade e de seus componentes - Exposição (IE), Sensibilidade (IS) e Capacidade Adaptativa (ICA). ..... 133

**Tabela 20.** Valores municipais do Índice de Cenário Climático 4.5 (ICC4.5) e seus sub-índices – Índice de Temperatura 4.5 (ITemp 4.5) e Índice de Precipitação (IPrec 4.5). ..... 135



<b>Tabela 21.</b> Valores médios, por microrregião, do Índice de Cenário Climático 4.5 (ICC4.5) e de seus sub-índices – Índice de Temperatura 4.5 (ITemp4.5) e de Precipitação 4.5 (IPrec4.5). .....	137
<b>Tabela 22.</b> Valores municipais do Índice de Cenário Climático 8.5 (ICC8.5) e seus sub-índices – Índice de Temperatura 8.5 (ITemp 8.5) e Índice de Precipitação (IPrec 8.5). .....	140
<b>Tabela 23.</b> Valores médios, por microrregião, do Índice de Cenário Climático 8.5 (ICC8.5) e seus sub-índices – Índice de Temperatura 8.5 (ITemp 8.5) e Índice de Precipitação (IPrec 8.5). .....	141
<b>Tabela 24.</b> Valores municipais dos principais índices que compuseram o Índice Municipal de Vulnerabilidade 4.5 e 8.5 – Índice de Vulnerabilidade (IV) e Índice de Cenário Climático (ICC4.5 e ICC8.5). .....	143
<b>Tabela 25.</b> Valores médios, por microrregião, dos principais índices que compuseram o Índice Municipal de Vulnerabilidade 4.5 e 8.5 – Índice de Vulnerabilidade (IV) e Índice de Cenário Climático (ICC4.5 e ICC8.5). .....	149

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CDD – Dias Consecutivos Secos  
CH<sub>4</sub> – Gás Metano  
CMIP5 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 5  
CO<sub>2</sub> – Gás Carbônico  
CPRM – Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais  
CRED – Centre for Research on the Epidemiology of Disasters  
ETCCDMI – *Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices*  
GEE – Gases do Efeito Estufa  
IADap – Índice de Instituições, Serviços e Infraestrutura para Adaptação  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
ICA – Índice de Capacidade Adaptativa  
ICC4.5 – Índice de Cenário Climático 4.5  
ICC8.5 – Índice de Cenário Climático 8.5  
ICVD - Índice de Cobertura Vegetal e Desmatamento  
IDAC – Índice de Doenças Associadas ao Clima  
IDHM – Índice de Desenvolvimento Humano Municipal  
IDN – Índice de Desastres Naturais  
IE – Índice de Exposição  
IES – Índice de Estruturas Socioeconômicas  
IFDM – Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal  
IMAZON – Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia  
IMV4.5 – Índice Municipal de Vulnerabilidade 4.5  
IMV8.5 – Índice Municipal de Vulnerabilidade 4.5  
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
IODN – Índice de Ocorrência de Desastres Naturais  
IOS – Índice de Organização Sociopolítica  
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change  
IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

IPO – Índice de Pobreza  
IPrec – Índice de Precipitação  
IPS – Índice de Progresso Social da Amazônia  
IS – Índice de Sensibilidade  
ISDN – Índice de Susceptibilidade a Desastres Naturais  
ISS – Índice de Sensibilidade Sociodemográfica  
ISS futuro – Índice de Sensibilidade Sociodemográfica Futuro  
ISS presente – Índice de Sensibilidade Sociodemográfica Presente  
ITemp – Índice de Temperatura  
IV – Índice de Vulnerabilidade  
MCR – Modelos Climáticos Regionais  
N<sub>2</sub>O – Óxido Nitroso  
NOAS - Normas Operacionais de Assistência à Saúde  
NOB – Normas Operacionais Básicas  
OMM – Organização Meteorológica Mundial  
PBF – Programa Bolsa Floresta  
PIB – Produto Interno Bruto  
PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento  
PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente  
ppm – Partes por milhão  
PRCPTOT - Precipitação Total Anual nos Dias Úmidos  
PRODES – Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite  
R95p – Precipitação Total Anual Diária > 95p  
RCP – Representative Concentration Pathways  
RX1day –  
RX5day – Precipitação Máxima Acumulada em 5 Dias Consecutivos  
SAARA – Sistema de Avaliação e Acompanhamento de Resultados Anuais do Plano Diretor de Educação do Estado do Amazonas  
SINAN – Sistema de Informação de Agravos de Notificação  
SIVEP-MALARIA – Sistema de Informação de Vigilância Epidemiológica da Malária  
SSE – Sistema Socioecológico

SUS – Sistema Único de Saúde

UCs – Unidades de Conservação

UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	24
<b>2 JUSTIFICATIVA</b> .....	27
<b>3 OBJETIVO GERAL</b> .....	28
3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	28
<b>4 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	29
4.1 A MUDANÇA CLIMÁTICA.....	29
4.2 MUDANÇA CLIMÁTICA, SEUS IMPACTOS E A SAÚDE DAS POPULAÇÕES ...	39
4.3 OS CONCEITOS DE VULNERABILIDADE E SUA APLICAÇÃO NO ÂMBITO DA MUDANÇA CLIMÁTICA.....	44
4.4 O USO DE INDICADORES COMO FERRAMENTA DE ESTUDO DA VULNERABILIDADE.....	49
<b>5 METODOLOGIA</b> .....	53
5.1 ÁREA DE ESTUDO.....	53
5.2 MODELO CONCEITUAL DO ESTUDO.....	57
5.3 HISTÓRICO DA CONSTRUÇÃO DO MODELO CONCEITUAL: A COOPERAÇÃO FIOCRUZ E MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE .....	58
5.4 VARIÁVEIS DO MODELO .....	59
5.5 CONSTRUÇÃO DO CENÁRIO CLIMÁTICO.....	60
5.6 CÁLCULO DO ÍNDICE MUNICIPAL DE VULNERABILIDADE .....	60
5.7 FONTE DOS DADOS .....	65
5.8 COMPONENTES DO ÍNDICE MUNICIPAL DE VULNERABILIDADE .....	65
5.8.1 Índice de exposição (IE) .....	65
5.8.1.1 Indicador de cobertura vegetal e desmatamento (ICVD) .....	71
5.8.1.2 Índice de desastres naturais (IDN).....	72
5.8.1.3 Cálculo do índice de exposição final (IE).....	75
5.8.2 Índice de sensibilidade (IS).....	75
5.8.2.1 Índice de doenças associadas ao clima (IDAC).....	76
5.8.2.2 Índice de pobreza humana (IPo) .....	79
5.8.2.3 Índice de sensibilidade sociodemográfica (ISS).....	81
5.8.2.4 Cálculo do índice de sensibilidade (IS) .....	83
5.8.3 Índice de capacidade adaptativa (ICA).....	83
5.8.3.1 Índice de estruturas socioeconômicas (IES) .....	84

5.8.3.2 Índice de instituições, infraestruturas e serviços para adaptação (IAdap).....	85
5.8.3.3 Índice de organização sócio-política (IOS) .....	87
5.8.3.4 Cálculo do índice de capacidade adaptativa (ICA).....	88
5.8.4 Índice de vulnerabilidade (IV).....	89
5.8.5 Índice de cenário climático (ICC).....	89
5.8.6 Índice municipal de vulnerabilidade (IMV) .....	92
<b>6 RESULTADOS</b> .....	<b>93</b>
6.1 OS TRÊS COMPONENTES FUNDAMENTAIS DA VULNERABILIDADE .....	93
6.1.2 O Índice de exposição.....	93
6.1.3 O Índice de sensibilidade.....	101
6.1.4 O índice de capacidade adaptativa.....	117
6.2 O ÍNDICE DE VULNERABILIDADE .....	128
6.3 ÍNDICES DE CENÁRIOS CLIMÁTICOS (ICC 4.5 E ICC 8.5).....	133
6.4 ÍNDICE MUNICIPAL DE VULNERABILIDADE (IMV 4.5 E IMV 8.5).....	143
<b>7 DISCUSSÃO</b> .....	<b>151</b>
7.1 O ÍNDICE DE VULNERABILIDADE PRESENTE .....	151
7.1.1 Os índices que mais incrementaram a vulnerabilidade.....	151
7.1.1.1 O índice de pobreza (IPo).....	151
7.1.1.2 O índice de doenças associadas ao clima (IDAC) .....	154
7.1.1.3 O índice de desastres naturais (IDN) .....	159
7.1.1.4 O índice de organização sociopolítica (IOS) .....	162
7.1.1.5 O índice de estruturas socioeconômicas (IES) .....	165
7.1.2 Os demais índices componentes da vulnerabilidade presente .....	169
7.1.2.1 O índice de cobertura vegetal e desmatamento (ICVD).....	169
7.1.2.2 O índice de sensibilidade sociodemográfica (ISS) .....	172
7.1.2.3 O índice de instituições, serviços e infraestrutura para adaptação (IADAp).....	182
7.2 O ÍNDICE DE CENÁRIO CLIMÁTICO .....	186
7.3 O ÍNDICE MUNICIPAL DE VULNERABILIDADE.....	190
<b>8 CONCLUSÃO</b> .....	<b>194</b>
<b>9 CONSIDERAÇÃO FINAIS E PERSPECTIVAS</b> .....	<b>196</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>198</b>
<b>APÊNDICES</b> .....	<b>224</b>

Apêndice A - Representação espacial das anomalias de temperatura máxima (A) e temperatura mínima (B) para o estado do Amazonas, considerando o cenário 4.5. ....	224
Apêndice B - Representação espacial das anomalias de precipitação considerando o cenário 4.5 – Rx5day (A), CDD (B), R950 (C) e PRCPTOT (D). ....	225
Apêndice C - Representação espacial das anomalias de temperatura máxima (A) e temperatura mínima (B) para o estado do Amazonas, considerando o cenário 8.5. ....	226
Apêndice D - Representação espacial das anomalias de precipitação considerando o cenário 8.5 – Rx5day (A), CDD (B), R950 (C) e PRCPTOT (D). ....	227

## 1 INTRODUÇÃO

O “*Intergovernmental Panel on Climate Change*” (IPCC), define vulnerabilidade como “a propensão ou predisposição a ser adversamente afetado” (IPCC, 2014a), cujos componentes básicos são a exposição, a sensibilidade e a capacidade adaptativa. A exposição se refere à presença de pessoas, ecossistemas, infraestrutura e ativos econômicos ou sociais em locais que podem ser adversamente afetados pela mudança do clima, ou seja, em locais que podem estar sob maior estresse climático ou ambiental. A sensibilidade está relacionada à capacidade que um sistema apresenta de ser afetado pela alteração ou variabilidade do clima e está intimamente associada às características internas desse sistema. Por fim, a capacidade adaptativa diz respeito à habilidade de um sistema se ajustar aos estresses climáticos e responder às consequências dessas alterações (ADGER, 2006; IPCC, 2014b; O'BRIEN et al., 2004). Esses três componentes são capazes de influenciar a vulnerabilidade, podendo incrementá-la ou reduzi-la de acordo com algumas características inerentes ao sistema humano ou ao sistema natural. O conjunto dessas características é específico de cada local e população e possui um arranjo particular de interação entre seus componentes, determinando perfis de vulnerabilidade únicos (ADGER; KELLY, 1999; CUTTER, 1996; CUTTER; MITCHELL; SCOTT, 2000).

Sob esse ponto de vista, a vulnerabilidade tem apresentado, nos últimos anos, uma abordagem multifatorial que engloba aspectos sociais, políticos, econômicos e ambientais distintos, incluindo cenários de mudanças climáticas futuras (BARATA & CONFALONIERI, 2011; LEICHENKO & O'BRIEN, 2002; O'BRIEN ET AL., 2004). Nesse sentido, as avaliações de vulnerabilidade têm se mostrado uma ferramenta eficaz ao permitir, dentre outras abordagens, o seu mapeamento (BARATA & CONFALONIERI, 2011; O'BRIEN et al., 2004; PRESTON, YUEN, & WESTAWAY, 2011; YUSUF & FRANCISCO, 2009). Algumas vantagens de se compreender a geografia da vulnerabilidade às alterações climáticas são: 1) poder contribuir para a melhor gestão do risco de desastres, 2) reduzir a exposição de ativos humanos e ecológicos e 3) identificar populações particularmente vulneráveis (PRESTON; YUEN; WESTAWAY, 2011).

A Amazônia tem enfrentado desafios que são inerentes à condição de desenvolvimento na qual seus países se encontram e que perpassam a necessidade de promover o progresso social e econômico aliado à preservação ambiental, incluindo as questões climáticas. Por um lado, os ecossistemas amazônicos, além de importantes redutos de biodiversidade e de



recursos naturais, também possuem papel ativo no intercâmbio entre a biosfera e atmosfera, seja em escala regional ou global, exercendo função essencial no equilíbrio climático (DAVIDSON et al., 2012; NOBRE; SELLERS; SHUKLA, 1991; SALATI; VOSE, 1984). Por outro lado, as condições socioeconômicas da população amazônica em relação à média nacional de seus respectivos países apresentam grande descompasso, ainda mais grave quando analisado da perspectiva das populações tradicionais, cujo contingente estimado é de 1,6 milhões de pessoas para todo o território da Amazônia (ARA, 2011; RAISG, 2012; SANTOS et al., 2014). A superação dessa condição encontra barreiras na pressão antrópica exercida sobre os ecossistemas amazônicos, devido à expansão da fronteira agrícola e do “desenvolvimento econômico” que têm reduzido sobremaneira a diversidade biológica, cultural e os serviços ecossistêmicos associados. A conjugação desses fatores com a mudança climática global tem mostrado seus efeitos na região – na Amazônia Brasileira, os últimos 10 anos apresentaram os maiores eventos do século relacionados à seca (2005 e 2010) e à inundação (2009 e 2012) – devido às alterações no regime de chuvas observados na bacia amazônica (DAVIDSON et al., 2012; GLOOR et al., 2013; LANGERWISCH et al., 2013; MARENGO et al., 2011a, 2011b; MARENGO; ESPINOZA, 2016)

O estado do Amazonas, no Brasil, não foge ao padrão socioambiental observado nos demais países amazônicos. O estado se encontra totalmente inserido na floresta amazônica e vem enfrentando problemas relacionados a: 1) políticas do uso da terra, devido à expansão agropecuária, abertura de estradas e construção de hidrelétricas; 2) à saúde, devido à alta incidência de doenças infecciosas e à necessidade de adaptação da infraestrutura às condições socioespaciais peculiares – o acesso é principalmente fluvial; e 3) à vulnerabilidade das populações tradicionais, grupo social muito prevalente no estado e que depende das atividades extrativistas e da agricultura familiar (CONFALONIERI, 2000, 2005; CONFALONIERI; MARGONARI; QUINTÃO, 2014; GASH; NOBRE, 1997; KATSURAGAWA et al., 2008; SAMPAIO et al., 2007; SOARES-FILHO et al., 2005).

Compreender, no contexto brasileiro, as fragilidades e capacidades dos municípios amazonenses frente à mudança do clima, cujos impactos também vêm sendo observados na maior floresta tropical do mundo, é um primeiro passo para fortalecer e preparar a população para lidar com a ameaça climática. Assim, visando embasar futuras políticas públicas de adaptação para a população do estado do Amazonas, Brasil, o presente trabalho apresenta uma metodologia para mapear a vulnerabilidade humana à mudança do clima no estado. Para tanto, foi construído um índice municipal de vulnerabilidade que combina cenários climáticos

regionalizados com características socioeconômicas, demográficas, ambientais e de saúde da população para compreender e comparar os perfis de vulnerabilidade dos 62 municípios amazonenses. A partir desse levantamento, tornam-se mais tangíveis propostas de adaptação adequadas à realidade do estado e que possam, em um futuro próximo, reduzir os impactos do clima sobre os territórios e populações do Amazonas.

## 2 JUSTIFICATIVA

Para o estado do Amazonas podem ser elencados diversos fatores que tornam a população susceptível às alterações do clima, como as práticas de uso da terra influenciando o microclima local, a degradação ambiental e suas consequências para o equilíbrio da biodiversidade, a existência de povos tradicionais com fortes laços com o meio natural e as características socioeconômicas ainda desfavoráveis, quando comparadas ao restante do país. Nesse contexto, os impactos esperados da mudança climática para a região podem ser negativamente exacerbados, interferindo na qualidade de vida e saúde da população em um futuro próximo. Dado que o foco principal do estudo é a saúde e o bem-estar humanos e os efeitos adversos que as mudanças climáticas podem ter sobre os sistemas sócioecológicos, é necessário que sejam identificadas as características da população amazonense que contribuem para sua vulnerabilidade. Dessa forma, será possível propor caminhos para sua adaptação que possam, simultaneamente, superar as barreiras socioeconômicas e tecnológicas ainda comuns aos países em desenvolvimento, e criar ou mesmo ampliar, no curto prazo, as ações adaptativas que mostrem viabilidade para a realidade local.

### **3 OBJETIVO GERAL**

Desenvolver indicadores de vulnerabilidade socioambiental e de saúde para os municípios do Amazonas, em função das mudanças ambientais e climáticas, sejam atuais ou projetadas.

#### **3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Desenvolver índices que permitam verificar o perfil de vulnerabilidade presente da população amazonense baseado na exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa;
- b) Desenvolver um índice climático que forneça um panorama das futuras alterações do clima projetadas para os municípios amazonenses;
- c) Avaliar situações locais de vulnerabilidade ao clima a partir da conjugação de cenários climáticos com a vulnerabilidade presente dos municípios do Amazonas;
- d) Fornecer aos gestores municipais e estaduais uma metodologia de fácil utilização que permita identificar os municípios mais vulneráveis no momento atual bem como monitorar a vulnerabilidade ao longo do tempo no estado do Amazonas.

## 4 REVISÃO DE LITERATURA

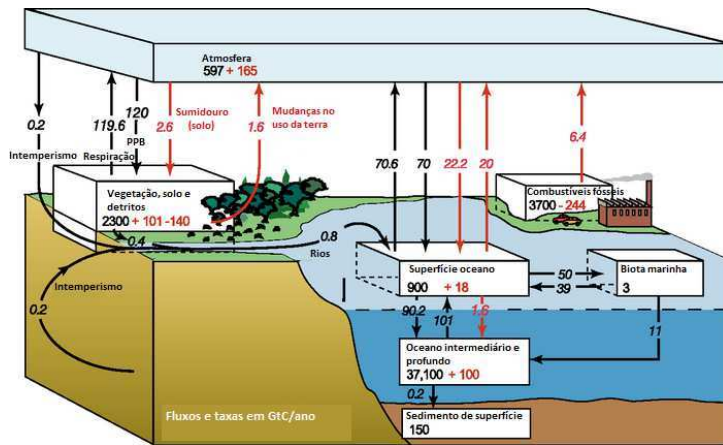
### 4.1 A MUDANÇA CLIMÁTICA

#### 4.1.1 O aquecimento global e a mudança climática observada

De maneira geral, o clima pode ser definido como um conjunto de condições meteorológicas (precipitação, temperatura, pressão atmosférica, etc) que se mantêm por determinados períodos de tempo nas diversas regiões do planeta. Ao longo da história, o clima da Terra passou por mudanças consideráveis devido à influência de processos naturais, como, por exemplo, pequenas variações na órbita do planeta que modificaram a quantidade de energia solar recebida. Essa variabilidade natural do clima pode ser percebida ao observar os últimos 650.000 anos, em que ocorreram diversos ciclos de aquecimento e resfriamento naturais, sendo o término da era glacial, há 7.000 anos, um marco da era climática moderna e da civilização humana (VIJAYAVENKATARAMAN; INIYAN; GOIC, 2012). Entretanto, a variabilidade natural do clima também pode interagir com modificações regionais advindas das atividades humanas, como o aumento das concentrações de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e as alterações nos padrões de uso da terra, causando modificações climáticas regionais (NOBRE; SELLERS; SHUKLA, 1991; SAMPAIO et al., 2007; VITOUSEK, 1992).

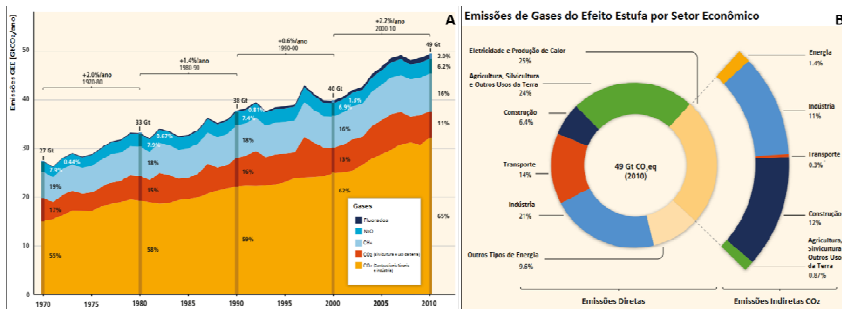
Um dos fatores determinantes do clima da Terra é a troca de gases que ocorre entre a atmosfera e outros fatores físicos como a água, o ar e a superfície do planeta, quer seja por processos naturais – atividades geológicas intensas – quer pelas atividades humanas, como a industrialização. Alguns desses gases são conhecidos como gases do efeito estufa (GEE) – CO<sub>2</sub>, óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), gás metano (CH<sub>4</sub>) – pois absorvem a radiação infravermelha refletida pela superfície terrestre e atmosfera, dificultando seu escape para o espaço (VITOUSEK, 1992). A capacidade de absorver a radiação refletida e armazená-la em forma de calor, nas camadas mais baixas da atmosfera, é um fenômeno natural indispensável para a manutenção da vida no planeta. Entretanto, fatores como crescimento exponencial das populações humanas, industrialização, desmatamento e queima de combustíveis fósseis vêm liberando GEE, principalmente CO<sub>2</sub>, na atmosfera em um ritmo muito mais acelerado do que os processos naturais. A figura 1 ilustra o papel de processos naturais e dos antropogênicos no ciclo global do carbono. Vê-se que os oceanos e a superfície terrestre (incluindo as florestas) emitem CO<sub>2</sub> em quantidades bastante superiores às atividades humanas. Porém, essa emissão

é compensada através da fixação do carbono, principalmente através da fotossíntese, fazendo com que oceanos, solos e florestas funcionem como sumidouros de carbono. Por outro lado, as atividades humanas não apresentam a capacidade de sumidouro, ficando o excedente de carbono livre na atmosfera.



**Figura 1.** Ciclo global do Carbono. As emissões e fixações de CO<sub>2</sub> são mostradas em gigatoneladas para as atividades antropogênicas (vermelho), para a vegetação e superfície terrestre, e para os oceanos (preto). Fonte: adaptado de IPCC AR4 - Climate Change 2007: Working Group I – The Physical Science Basis.

Desde o início da era pré-industrial, por volta dos anos 1750, as atividades humanas adicionaram quantidades significativas de carbono na atmosfera. De acordo com o 5º Relatório sobre Mudança do Clima do IPCC (IPCC AR5), cerca de metade das emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub> ocorreram nos últimos quarenta anos, sendo as emissões de GEE, ocorridas entre as décadas de 2000 e 2010, as maiores da história da humanidade (IPCC, 2014a). Cerca de 78% do aumento no total de GEE emitidos entre 1970 e 2010 correspondem ao CO<sub>2</sub> advindo da queima de combustíveis fósseis e processos industriais (IPCC, 2014a). A figura 2 dá uma dimensão das emissões antropogênicas anuais de GEE entre 1970 e 2010, bem como os principais setores econômicos envolvidos nas emissões em 2010.

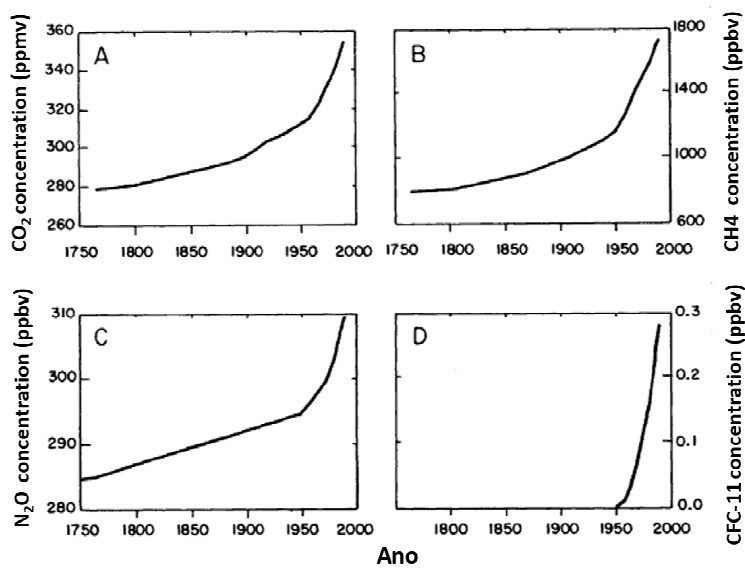


**Figura 2. A-** Total anual das emissões de gases do efeito estufa antropogênicos em gigatons/ano para o período de 1970 a 2010, por gases: CO<sub>2</sub> da queima de combustíveis fósseis e processos industriais, CO<sub>2</sub> de florestas e outros usos da terra, metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e gases fluorados abarcados pelo Protocolo de Kyoto. **B-** Total das emissões de gases antropogênicos do efeito estufa em gigatons/ano de setores econômicos em 2010. Fonte: adaptado de IPCC, 2014.

A maior concentração de gases do efeito estufa na atmosfera tem levado a um aquecimento com consequentes impactos no clima da Terra, ocasionando o fenômeno conhecido como mudança climática global. O IPCC, em seu 5º Relatório, define mudança climática como mudanças no estado do clima que são percebidas por alterações na média e/ou na variabilidade de suas propriedades, podendo persistir por períodos extensos (IPCC, 2014b). É importante notar que o Painel considera a mudança do clima como qualquer alteração climática ao longo do tempo, seja pela variabilidade natural, seja pela atividade humana. Por outro lado, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC, sigla em inglês) considera a mudança climática como aquela atribuída direta ou indiretamente à ação humana e que altera a composição da atmosfera, funcionando como fator adicional à variabilidade natural do clima e observado em períodos de tempo comparáveis (SOLOMON et al., 2007).

As reconstruções de temperatura durante os últimos 1.000 anos apontam que as mudanças da temperatura global não são devidas apenas a causas naturais, ainda que existam incertezas nos registros paleoclimáticos (MARENGO, 2006). Um indicativo das contribuições antrópicas para a mudança do clima é o registro das concentrações de CO<sub>2</sub> a partir de amostras do gelo polar – essas concentrações permaneceram estáveis em níveis próximos de 280ppm durante um milênio, até começarem a aumentar a partir de 1750, com o início da Revolução Industrial. Posteriormente, medidas instrumentais da composição da atmosfera foram feitas a partir de 1957 e revelaram que a concentração de CO<sub>2</sub> subiu de

317ppm para 391ppm em 2011 (IPCC, 2013). A figura 3 mostra como evoluíram as concentrações de CO<sub>2</sub> e de outros GEE considerados estáveis entre os anos de 1750 e 2000.



**Figura 3.** Aumento na concentração de gases do efeito estufa considerados estáveis, entre os anos de 1750 e 2000. A: dióxido de carbono; B: metano; C: óxido nitroso; D: clorofluorcarbono-11. Fonte: adaptado de VITOUSEK (1992).

O grupo de trabalho I do IPCC, através do AR5, afirma que a temperatura média global da superfície do planeta tem aumentando desde o século XIX e que as últimas três décadas têm sido, sucessivamente, mais quentes que as anteriores, sendo a primeira década do século XXI a mais quente já registrada (HARTMANN et al., 2013). Para o IPCC, a influência humana sobre o sistema climático é clara e o aquecimento do planeta é fato inequívoco. De fato, as evidências compiladas pelo IPCC AR5 sobre a mudança climática observada são convincentes (IPCC, 2013):

- Aumento do nível do mar: a taxa de elevação do nível do mar durante o século XIX foi maior que a taxa média dos últimos 2 mil anos. Entre 1901 e 2010, o aumento global médio dos oceanos foi de 0,19m;
- Atmosfera: a média global da temperatura da superfície da terra e dos oceanos mostra um aquecimento de 0,85°C entre 1880 e 2012, sendo que praticamente todo o globo experimentou um aumento da temperatura de superfície;



- Oceanos: o aumento da energia estocada no sistema climático está vinculado principalmente ao aquecimento dos oceanos, com mais de 90% da energia acumulada entre 1971 e 2010. O aquecimento dos oceanos é maior próximo à superfície, que esquentou 0,11°C/década entre 1971 e 2010;
- Criosfera: as calotas polares da Antártida e da Groelândia vêm perdendo massa nos últimos 20 anos, havendo diminuição das extensões de neve e gelo no Ártico e Hemisfério Norte;
- Ciclo do carbono: as emissões de GEE são as maiores desde 800 mil anos atrás. Cerca de 30% do CO<sub>2</sub> antropogênico emitido foi absorvido pelos oceanos, causando sua acidificação.

#### **4.1.2 Projeções de mudança do clima para o mundo e para o Brasil**

Diversos estudos demonstram as futuras mudanças climáticas projetadas para diferentes escalas de tempo até o final do século XXI. Para responder como o clima irá se comportar frente às futuras modificações no uso da terra e nas emissões antropogênicas, são utilizados Modelos Climáticos Globais (MCG) considerando diferentes cenários de emissão de GEE (CHOU et al., 2014).

Estudos reconhecidos mundialmente são os relatórios do IPCC, órgão fundado em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). O objetivo do Painel é apoiar, com a análise de trabalhos científicos, as avaliações do clima e os cenários de mudanças climáticas para o futuro, avaliando o conhecimento existente no mundo sobre a mudança climática global. O IPCC faz uso de diversos modelos acoplados oceano-atmosfera produzidos por diferentes institutos de pesquisa ao redor do mundo como, por exemplo, o HadCM3, do Hadley Centre na Inglaterra, e o MIROC5, da Universidade de Tóquio. A esses modelos o IPCC vem associando cenários socioeconômicos e de emissões para fornecer descrições plausíveis da evolução do clima futuro publicados, desde 1990, através dos relatórios IPCC FAR, IPCC SAR, IPCC TAR, IPCC AR4 e IPCC AR5. Uma série de características pode ser usada como constituinte dos modelos climáticos – mudanças socioeconômicas e tecnológicas, uso da terra, emissão de poluentes e de GEE, dentre outros – e servem de orientação para avaliar os possíveis impactos do clima e as opções de mitigação (VAN VUUREN et al., 2011).

Em seu 5º Relatório, o IPCC inaugurou uma nova série de 4 cenários, produzidos pela comunidade científica, chamados de Representative Concentration Pathways (RCPs), que representam trajetórias de concentração de GEE e não mais de emissão, como apresentado nas edições anteriores. Cada RCP leva em conta uma trajetória de atividade econômica, usos de energia, crescimento populacional e outros fatores socioeconômicos que serão capazes de influenciar a concentração de GEE até o ano 2100 (IPCC, 2013; VAN VUUREN et al., 2011). O termo “representative” denota que os RCPs construídos são representativos de um conjunto maior de cenários existentes na literatura científica e o termo “concentration pathways” significa que os mesmos não são um pacote final de projeções socioeconômicas, climáticas e de emissões, mas sim uma série de projeções consistentes sobre as forçantes radiativas (VAN VUUREN et al., 2011). A forçante radiativa representa uma medida cumulativa das emissões humanas de GEE de todas as fontes até 2100, expressa em watts por metro quadrado, em relação ao período pré-industrial (1750). Assim, os novos cenários foram nomeados de acordo com essas forçantes radiativas da seguinte forma: RCP2.6 ( $2,6 \text{ Wm}^{-2}$ ), RCP4.5 ( $4,5 \text{ Wm}^{-2}$ ), RCP6.0 ( $6,0 \text{ Wm}^{-2}$ ) e RCP8.5 ( $8,5 \text{ Wm}^{-2}$ ) (IPCC, 2013). O RCP2.6 compreende um cenário de mitigação em que a forçante radiativa é baixa, os RCPs 4.5 e 6.0 constituem cenários de emissão estáveis e o RCP8.5 se apresenta como um cenário de altas emissões. Esses novos cenários de emissões foram usados para as recentes simulações climáticas desenvolvidas no âmbito do quadro do Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) para o 5º Relatório do IPCC. De maneira geral, as projeções de alterações no sistema climático global apontam (IPCC, 2013):

- Temperatura do ar: para o período 2016-2035, as projeções apontam um aumento entre  $0,3^{\circ}\text{C}$  e  $0,7^{\circ}\text{C}$  na temperatura global média em comparação a 1986-2005 sob todos os RCPs. Para o final do século XXI (2081-2100), a mudança na temperatura média global deve exceder os  $1,5^{\circ}\text{C}$  para os cenários RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5, considerando o baseline 1850-1900;
- Ciclo da água: as mudanças na média de precipitação não serão uniformes, havendo projeções de intensificação das chuvas nas áreas tropicais e de redução nas regiões secas. Para todos os RCPs, as variações na precipitação relacionadas ao fenômeno El Niño irão se intensificar;
- Criosfera: todos os cenários RCPs projetam reduções anuais no gelo do Ártico. As coberturas de gelo permanente nas latitudes mais ao norte irão reduzir com o

aumento da temperatura, havendo perspectivas de redução de 37% para o RCP2.6 e de 81% para o RCP8.5;

- Aumento do nível do mar: o nível médio dos oceanos continuará se elevando e não será uniforme ao redor do globo. Há projeção de uma taxa de elevação entre 8 e 16mm/ano para o período 2081-2100, considerando o RCP8.5.

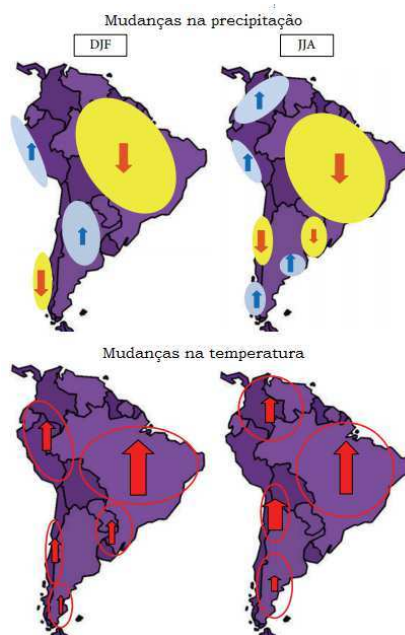
Enquanto ferramenta que alia projeções de mudança do clima a diferentes cenários de emissão, os modelos globais são uma rica fonte de informação; porém, características regionais como topografia e bacias hidrográficas não são bem representadas pelas simulações globais (CHOU et al., 2014). Para avaliar os impactos da mudança climática e as vulnerabilidades associadas, os Modelos Climáticos Regionais (MCR) são mais adequados, fornecendo informações em escalas menores para a condução de avaliações dos impactos em áreas localizadas (CHOU et al., 2014; FLATO et al., 2013). Dessa forma, os MCRs permitem fazer um detalhamento do modelo global (downscaling) para o nível regional e para períodos de tempo determinados.

Diversos autores fizeram essa regionalização para a América do Sul e para escalas ainda menores, como a Amazônia, usando diferentes modelos e cenários, como por exemplo, o Eta-HadCM3, o Eta-MIROC5 e o Eta-BESM (CHOU et al., 2014; LAPOLA et al., 2011; MARENGO, 2014; NOBRE; SAMPAIO; SALAZAR, 2008; NUNEZ; SOLMAN; CABRÉ, 2009; OMETTO et al., 2013; SALAZAR; NOBRE; OYAMA, 2007). Para a América do Sul, por exemplo, cenários futuros de clima derivados do modelo Eta-HadCM3 A1B mostraram que as mudanças do clima apresentam variabilidade regional, diferindo, principalmente, no que se refere à precipitação.

De maneira geral, modelos apontam que a América do Sul vem experimentando um aumento nos extremos de temperatura e precipitação desde os anos 1950, havendo projeções climáticas de um aumento ainda maior desses extremos até o final do século XXI (MARENGO et al., 2010, 2014; TEBALDI, 2007). TORRES & MARENGO (2013) demonstraram que a possibilidade de aumento da temperatura acima dos 2°C é muito provável (>90%) para toda a região em todas as estações do ano. BLÁZQUEZ; NUÑEZ & KUSUNOKI (2012), usando modelos climáticos da Agência Meteorológica Japonesa, observaram que as mudanças na temperatura serão de aumento para a América do Sul, principalmente nos Andes e latitudes tropicais da região. A maior parte do subcontinente também experimentará aumento na precipitação, exceto o sul do Chile. Dessa forma, os autores sugerem que a precipitação pode ter impacto maior do que o aquecimento em algumas

localidades, como na Bacia do Rio Prata, cuja expectativa é de aumento da vazão (BLÁZQUEZ et al., 2012).

As mudanças projetadas pelo modelo RegHad com base nos cenários de emissões do IPCC AR4 mostram que, até o final do século XXI, pode haver uma elevação da temperatura média entre 2°-3°C no sul da Argentina/Chile e de 3-5°C na Amazônia Brasileira, Colômbia, Venezuela e Peru, durante o verão (REBOITA et al., 2014). Diminuições na precipitação diária da ordem de 1,5mm são esperados para a porção sul da América do Sul e de 2,5mm/dia para a região norte/noroeste do subcontinente durante o verão (REBOITA et al., 2014). SOLMAN (2013) fez uma revisão das dificuldades, incertezas e dos progressos alcançados durante o desenvolvimento de MCRs por diferentes pesquisadores para a América do Sul a partir dos anos 2000. A autora evidencia que, embora existam diferenças entre os modelos e as resoluções usadas por cada grupo em suas regionalizações, há um conjunto de evidências qualitativas comuns quanto às mudanças projetadas para a região, como pode ser visto na figura 4.



**Figura 4.** Mudanças qualitativas projetadas para o final do século XXI sob o cenário de emissão A2 do IPCC AR4: o painel superior mostra as mudanças esperadas na precipitação e o painel inferior as mudanças esperadas na temperatura. O tamanho das setas indica a magnitude das mudanças projetadas. Fonte: SOLMAN (2013).

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) gerou os primeiros modelos regionalizados de clima para o Brasil em 2007. Os mais recentes foram publicados em 2014 e utilizaram o Eta 20km acoplado a três modelos globais - HadGEM2 ES, MIROC5 do Japão e Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre – com base nos RCPs 4.5 e 8.5 do IPCC (MARENGO et al., 2014). Embora todos os modelos citados tenham como foco o Brasil, diferenças podem ser observadas nas projeções climáticas de cada um deles. As projeções climáticas e ambientais geradas pela modelagem do clima trazem consigo diversos níveis de incertezas, a saber: incerteza sobre os cenários de emissões, incerteza sobre a variabilidade natural do sistema climático e a incerteza dos modelos (SOUZA; MANZI, 2014). O grupo de trabalho I do IPCC, responsável pela avaliação da base física das alterações climáticas, explica que, embora os modelos globais de onde se originam as regionalizações se baseiem nos mesmos princípios físicos, os cientistas precisam fazer aproximações para lidar com a complexidade do sistema climático. Essas aproximações podem ser distintas entre os diferentes grupos e institutos responsáveis pela construção dos vários modelos globais, o que produz diferenças nas projeções climáticas dos modelos, incluindo as regionalizações (IPCC, 2013). Por exemplo, alguns modelos projetaram climas mais chuvosos e outros climas mais secos para a Bacia Amazônica; por outro lado, alguns modelos sugeriram aumento da precipitação, enquanto a maioria indicou redução de chuvas para o Nordeste brasileiro (MARENGO et al., 2014).

Alguns estudos recentes para o clima no Brasil mostram essas divergências. CHOU e cols. (2014) usaram dois modelos climáticos regionais (ETA-HadGEM e ETA-MIROC5) para avaliar a mudança do clima na América do Sul sob os cenários RCP4.5 e 8.5 e demonstraram que, para o Brasil, os locais mais sensíveis para aumento de temperatura são também os mais populosos do país, as regiões Central e Sudeste. No verão, de acordo com o modelo ETA-MIROC5, o aquecimento pode ser de 1,5°C a 2°C até o ano de 2040, enquanto as simulações do ETA-HadGEM mostram um aquecimento de até 4°C para o mesmo período (CHOU et al., 2014). Indicadores de extremos climáticos oriundos dos modelos ETA-HadGEM e ETA-MIROC5 mostram: 1) uma redução da precipitação anual durante o século XXI para as regiões Amazônica e Sudeste do país, com uma redução anual total de cerca de 700mm até o final do século e 2) aumento dos dias consecutivos secos na região Nordeste do Brasil, onde se localiza a região semi-árida, com intensificação dessa condição até o final do século (CHOU et al., 2014). Já TORRES e cols. (2012) fizeram um estudo sobre os hotspots

sócioclimáticos no Brasil usando o Índice de Mudança Climática Regional (RCCI na sigla em inglês) para identificar as regiões nas quais a mudança do clima poderia ser mais proeminente – o RCCI faz uso de parâmetros como diferença de temperatura regional e global, mudanças na precipitação média regional, dentre outros. Os autores demonstraram que a porção oeste da região Nordeste, o noroeste de Minas Gerais e as regiões Centro-Oeste e Norte do país concentraram o maior número de hotspots climáticos devido a fatores como mudanças na média e na variação interanual da precipitação e temperatura. A figura 5 compila as principais projeções do clima, por região, para o Brasil.

## As projeções até o fim do século

Em relação aos níveis atuais, a temperatura poderá subir em todos os biomas; mais chuva é prevista nos pampas e menos na Amazônia

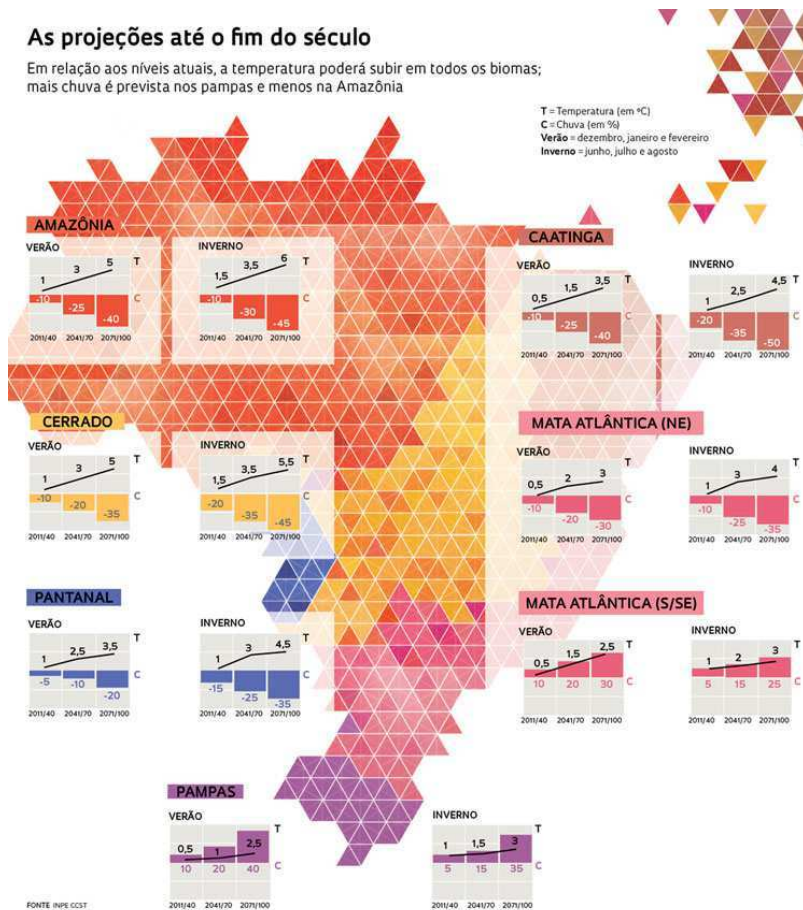


Figura 5. Resumo das projeções de mudança do clima para o Brasil e suas grandes regiões com base nos resultados do Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM). Fonte: PIVETTA (2013).

## 4.2 MUDANÇA CLIMÁTICA, SEUS IMPACTOS E A SAÚDE DAS POPULAÇÕES

As alterações antrópicas e climáticas impulsionadas pelo modelo de desenvolvimento econômico vigente, acarretam uma série de impactos aos sistemas naturais e humanos. Os impactos podem ser duradouros ou passageiros e serão maiores nos setores dependentes do clima, como agricultura, saúde e água. Como impactos se entende os efeitos dos eventos climáticos sobre um sistema, abrangendo aspectos como vidas, saúde, ecossistemas, economia,

cultura e infraestrutura. Os impactos que a mudança do clima pode determinar sobre as sociedades humanas dependem de dois aspectos fundamentais; 1) da magnitude e da distribuição espacial dos fatores de perigo associados ao clima (temperatura; precipitação; umidade, ventos, etc.); e 2) da vulnerabilidade da população, sendo esta caracterizada pela exposição ao perigo, pela sensibilidade a estes fatores e pela capacidade adaptativa do grupo social.

De maneira geral, os principais impactos observados compreendem as alterações nos sistemas hidrológicos; mudanças na distribuição geográfica, migração e abundância de espécies; inviabilização de determinadas culturas, como trigo e milho, trazendo preocupações para a segurança alimentar mundial; aumento da carga de doenças e da mortalidade relacionada ao clima – ondas de calor, doenças de veiculação hídrica e vetoriais; aumento da vulnerabilidade a extremos climáticos como secas, ciclones e inundações; dentre outros. De acordo com o IPCC, os impactos futuros incluem extinção significativa de espécies nas áreas tropicais, substituição das florestas tropicais por savanas, aumento do número de pessoas sob estresse hídrico, redução das culturas de arroz, aumento das pragas e doenças relacionadas à agricultura e aumento do risco nas áreas costeiras devido à elevação do nível do mar. Todos esses exemplos demonstram o quanto os sistemas, sejam naturais ou humanos, são altamente susceptíveis às alterações climáticas (IPCC, 2014a).

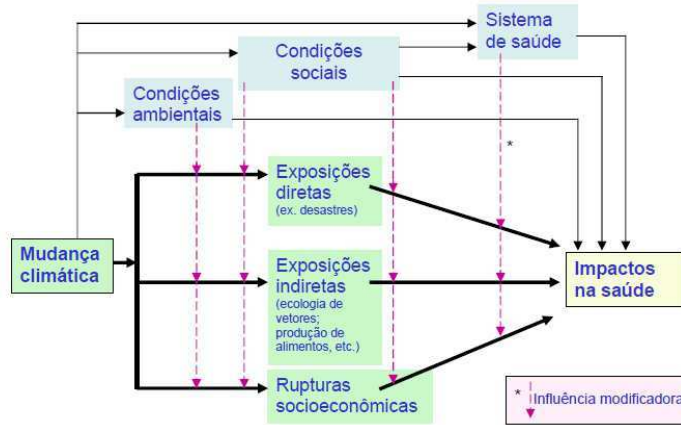
É importante ressaltar que, dentro do escopo desse trabalho, são considerados os impactos do clima sobre os sistemas socioecológicos (SSE), sendo estes compreendidos pela população humana de um determinado território, seu ambiente construído e o ambiente natural. De acordo com OSTROM (2009), o SSE é constituído por subsistemas de recursos, de unidades, de usuários e de governança. Sendo assim, os diversos subsistemas, apesar de individuais, interagem gerando efeitos no nível macro do SSE, o qual em um processo de “*feedback*”, afeta os subsistemas e seus componentes. Os efeitos sobre o SSE são múltiplos, assim como as respostas a eles; entretanto, o foco do presente trabalho são os efeitos adversos sobre o bem-estar e saúde das populações.

Nesse sentido, os impactos da mudança climática global e regional são reconhecidamente capazes de interferir na saúde das populações, diretamente ou indiretamente (Figura 6). O IPCC (SMITH et al., 2014) aponta três caminhos pelos quais a mudança climática pode impactar a saúde:

- 1) Diretos, através do aumento da morbimortalidade por eventos extremos, como secas, inundações e ondas de calor;



- 2) Indiretos sobre os sistemas naturais, em que o aumento da temperatura e da precipitação pode influenciar a reprodução dos vetores e as condições de transmissão das doenças de veiculação hídrica;
- 3) Indiretos sobre os sistemas sociais, em que as transformações ambientais podem ocasionar perdas na agricultura, insegurança alimentar, desnutrição, deslocamento de populações e danos às estruturas de saúde.



**Figura 6.** Mecanismos de ação da mudança do clima na saúde. Fonte: IPCC (2007).

O IPCC AR5 aponta como um risco-chave da mudança climática a perda de ecossistemas, biodiversidade e de bens e serviços proporcionados pelos sistemas naturais, como por exemplo, a regulação do clima local, a disponibilidade de água limpa e a provisão de alimentos. Junto à ameaça climática, também incide sobre o sistema natural a demanda humana por comida, espaço e matéria-prima que suprime os ecossistemas e vem acelerando a extinção de espécies.

Sob o aspecto estritamente ecológico, evidências científicas demonstram que as alterações antropogênicas do clima e a distribuição e fenologia das espécies, principalmente nas latitudes mais altas (PARMESAN; YOHE, 2003; ROOT et al., 2003). PARMESAN & YOHE (2003), usando metanálise para os aumentos de temperatura já observados no século XX, observaram alterações na fenologia de plantas e animais, com uma antecipação de 2,3 dias por década nas atividades relacionadas à primavera como a reprodução dos sapos, construção dos ninhos das aves e brotamento das árvores. As florestas também são particularmente sensíveis à mudança do clima, uma vez que o ciclo de vida longo não permite

que as árvores se adaptem rapidamente às alterações climáticas. MIDGLEY e cols. (2002) estudando o bioma Fynbos na região Floral do Cabo, África do Sul, um hotspot global de biodiversidade, observaram que pode haver uma perda entre 51% e 65% desse bioma até 2050, sendo que 1/3 das espécies pode sofrer deslocamento completo de sua distribuição no mesmo período. Para a Amazônia, modelagens climáticas mostraram que das 69 espécies de Angiospermas estudadas por MILES e cols. (2004), 43% se tornariam inviáveis até 2095 devido à redução drástica de sua distribuição. Essa perda drástica de biodiversidade, por consequências diretas da mudança do clima ou pela pressão antrópica, significa que importantes substâncias e genes de relevância médica podem nunca ser descobertos. Ainda em 1997, MYERS havia estimado que 5/6 das propriedades medicinais disponíveis nas florestas tropicais ainda não tinham sido descobertas pela humanidade. Além desse fator, é importante considerar que a biodiversidade de um ecossistema é o pilar para o fornecimento de bens e serviços - ecológicos, ambientais, sociais ou econômicos – sendo, por isso, também responsável pela resiliência desses serviços em cenários de estresse ambiental e de mudança do clima (McMAHON et al., 2011).

Os impactos da mudança do clima no sistema natural também estão, em muito, associados ao aumento da carga de doenças infecciosas, especialmente as vetoriais, dado que os agentes etiológicos e vetores são particularmente sensíveis às condições do clima. Fatores físicos como temperatura, umidade e precipitação são bem documentados na literatura influenciando o risco e a sazonalidade de doenças, o que, juntamente com as alterações antrópicas do ambiente, elevam a susceptibilidade das populações, principalmente as mais pobres a doenças endêmicas como Malária, Leishmanioses e Doença de Chagas (GOTTDENKER et al., 2012; PATTANAYAK et al., 2006; SALOMÓN et al., 2012; VITTOR et al., 2009). Em relação à transmissão de doenças, as alterações mais relevantes são as relacionadas às taxas de sobrevivência e reprodução dos vetores, aos padrões temporais de atividade do vetor e às taxas de sobrevivência e reprodução do patógeno (GITHEKO et al., 2000; GUBLER et al., 2001; KOVATS et al., 2001). Outros fenômenos climáticos naturais, como o El Niño, também estão associados à maior incidência de determinadas doenças infecciosas, como documentado para a Malária em parte da América do Sul e para o Cólera na Índia, o que aliado à expectativa de intensificação do fenômeno com a mudança do clima traz implicações graves para a saúde pública nas regiões afetadas (HAINES; PATZ, 2004; MANTILLA; OLIVEROS; BARNSTON, 2009; PASCUAL; BOUMA; DOBSON, 2002). Para o Brasil, estudos apontam a influência dos fenômenos La Niña e El Niño nos extremos

climáticos relacionados às chuvas e secas em diversas bacias hidrográficas (VALVERDE; MARENGO, 2014). Os resultados demonstraram que o fenômeno El Niño esteve relacionado com dias consecutivos secos (CDD) e chuvas fortes de curta duração (RX5day e RX1day) na bacia do São Francisco, com chuvas fortes e curtas mais intensas na bacia do Paraná e com as secas na bacia Amazônica. Os eventos La Niña estiveram relacionados com CDDs de maior magnitude na bacia do Tocantins (VALVERDE; MARENGO, 2014).

No que se refere aos ciclos hidrológicos, estes vêm sendo alterados globalmente em função do derretimento das geleiras e das modificações nos padrões de precipitação desencadeados pela mudança do clima, com impactos importantes para a disponibilidade de água (IPCC, 2013). Estudos demonstraram que a precipitação média anual está relacionada ao escoamento médio dos rios nos Estados Unidos e que o aquecimento global pode ter efeitos significativos na hidrologia das Bacias do Ganges, Brahmaputra e Meghna, com possibilidade de inundações severas em Bangladesh (ARNELL, 1992; MIRZA, 2002). No continente asiático, espera-se que, em um primeiro momento, o aumento do degelo dos Himalaias implique aumento da descarga de água devido à sua contribuição de até 45% para o fluxo dos rios (XU et al., 2009). Porém, os efeitos a longo prazo podem ser a escassez de água e suprimentos para as comunidades à jusante dos rios, principalmente durante a estação seca (XU et al., 2009). Para a América do Sul, estudos usando diferentes modelos climáticos mostraram um incremento na vazão de rios da Bacia Amazônica até o final do século (AERTS et al., 2006; NAKAEGAWA; KITO; HOSAKA, 2013) e diminuição consistente em outras bacias do Brasil, como nas Bacias do Rio Tapacurá e Parnaíba (MONTENEGRO; RAGAB, 2012; PALMER et al., 2008). Os efeitos do clima sobre componentes essenciais dos ciclos hidrológicos, como a evapotranspiração, irão refletir também na irrigação para agricultura e no planejamento e manejo dos recursos hídricos. Esse fato foi demonstrado por vários autores para a região Nordeste do Brasil, onde são projetados aumento das demandas humana e de irrigação (ARNELL; GOSLING, 2013; GONDIM et al., 2012; VIJAYAVENKATARAMAN; INIYAN; GOIC, 2012).

No aspecto social, existem evidências de que eventos extremos, como secas, enchentes, ondas de calor e de frio, furacões e tempestades, têm afetado diferentes partes do planeta e produzido perdas econômicas e de vidas (MARENGO, 2006). Os eventos naturais representam uma faceta da variabilidade climática do planeta e podem ocorrer em cenários estáveis ou de mudanças das condições do clima. Entretanto, o que se observa é que as modificações ambientais naturais e as desencadeadas pela atividade humana têm contribuído

para a ocorrência de eventos naturais extremos cada vez mais intensos. As projeções de mudanças do sistema climático para o final do século XXI apontam que o aumento da temperatura média do planeta poderá influenciar na maior incidência de ondas de calor; na intensificação de fenômenos naturais como o El Niño e em uma distribuição desigual da precipitação, havendo aumento dos eventos extremos de precipitação nas regiões mais úmidas e diminuição nas regiões secas (IPCC, 2014a). Alterações são esperadas também na ocorrência de ciclones intertropicais, de inundações fluviais e na intensificação das secas (IPCC, 2012). De acordo com o IPCC AR5, eventos como tempestades severas, aumento do nível do mar e inundações costeiras e urbanas representam um grande risco à saúde e à manutenção dos meios de subsistência das populações, bem como causam danos à infraestrutura de serviços críticos, como os de saúde. Essa capacidade de gerar grandes impactos quando incide sobre os sistemas humanos faz com que os eventos extremos ou naturais sejam frequentemente associados à ocorrência de desastres. De acordo com a base de dados do “*Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*” (CRED), desastres como epidemias, vendavais, incêndios florestais, secas, dentre outros, têm aumentado tanto em número quanto em intensidade desde 1930. Entre 1986 e 2006, estima-se que mais 2,5 bilhões de pessoas tenham sido afetadas por inundações, mais 1,5 milhões pela seca e cerca de 650 mil por tempestades de vento ao redor do mundo (ADIKARI; YOSHITANI, 2009).

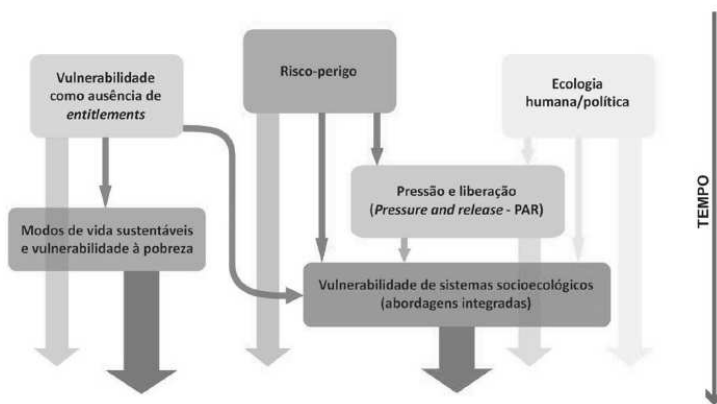
O Brasil apresenta elevada susceptibilidade aos impactos da mudança do clima. O país é extremamente dependente da exportação de commodities e da agricultura de pequeno porte, sua matriz energética se baseia principalmente em hidrelétricas e ainda são recorrentes a pobreza, epidemias e as inequidades sociais (CONFALONIERI, 2003; CONFALONIERI; FONSECA, 2013; DE LUCENA et al., 2009; IPEA, 2011; TORRES et al., 2012). No país, a magnitude dos efeitos dependerá, em grande medida, de fatores moduladores como o meio ambiente e da efetividade dos sistemas sociais em proteger as populações humanas (CONFALONIERI; MARINHO, 2007). Para a Amazônia, por exemplo, possíveis impactos relacionados à mudança do clima e ao desmatamento poderão ser a maior frequência de incêndios florestais e ameaças à biodiversidade dos ecossistemas tropicais.

#### **4.3 OS CONCEITOS DE VULNERABILIDADE E SUA APLICAÇÃO NO ÂMBITO DA MUDANÇA CLIMÁTICA**

O termo vulnerabilidade tem suas raízes na geografia e nas linhas de pesquisa sobre perigos naturais relacionados aos desastres (BLAIKIE et al., 1994), sendo um conceito central

de diversas áreas como ecologia, saúde pública, segurança alimentar e mudança climática. De modo geral, a vulnerabilidade se refere a um estado de susceptibilidade ao dano devido à exposição a um fator de perigo (“*hazard*”), ou seja, remete à forte ideia de perda, de insegurança, de suscetibilidade a um determinado dano (FEITOSA; MONTEIRO, 2012). Esse termo pode carregar uma variedade de significados implícitos a depender de sua utilização prática, como resiliência, adaptabilidade, risco, exposição, capacidade adaptativa, dentre outros (FÜSSEL, 2007; LIVERMAN, 1990). É justamente essa diversidade de significados que revela a riqueza do conceito de vulnerabilidade e lhe permite operar como um conceito mediador em diferentes disciplinas ou perspectivas, referindo-se ao mesmo objeto, fenômeno, processo ou estado, mas com significados distintos em cada uma das áreas (FEITOSA; MONTEIRO, 2012; MOLLINGA, 2008).

Segundo ADGER (2006), os estudos de vulnerabilidade apresentam duas correntes principais: a vulnerabilidade social, que trata dos meios de subsistência e pobreza, e a vulnerabilidade relacionada aos SSE (Figura 7).



**Figura 7.** Tradições de pesquisa em vulnerabilidade e sua evolução. Fonte: FEITOSA; MONTEIRO (2012).

A primeira linha teórica tem suas raízes nos trabalhos clássicos de SEN (1981, 1985) que na tentativa de aprimorar o espaço informacional da pobreza concebeu a teoria dos “entitlements”, estes compreendidos “como um conjunto de pacotes alternativos de bens que uma pessoa pode adquirir usando a totalidade de direitos e oportunidades ao qual tem acesso” (SEN, 1997, p.497). Dessa forma, a vulnerabilidade seria a ausência de “entitlements” – moradia, terra, trabalho, assistência social – ou seja, a inexistência de fontes de bem-estar e

renda que sejam potencialmente reais (FEITOSA; MONTEIRO, 2012). Esta corrente pioneira enfatiza a sensibilidade e a capacidade diferenciada de indivíduos e coletividades de lidar com a exposição ao risco, sendo, portanto, a vulnerabilidade o resultado de uma série de fatores socioeconômicos, culturais e institucionais (FEITOSA; MONTEIRO, 2012). CUTTER; BORUFF & SHIRLEY (2003) definem a vulnerabilidade social como um produto tanto das inequidades sociais – fatores que influenciam e moldam a susceptibilidade de vários grupos ao dano e que também governam sua habilidade de responder – quanto das inequidades espaciais – características das comunidades e do ambiente construído que contribuem para a vulnerabilidade social dos lugares. Uma crítica a essa corrente está em seu foco exclusivo na esfera social e seus desdobramentos (status social, gênero e bem-estar), subestimando a dinâmica dos sistemas biofísicos e seus riscos associados (ADGER, 2006).

Já os estudos de vulnerabilidade dos sistemas socioecológicos desenvolveram um conhecimento voltado para os riscos ambientais associados aos parâmetros sociais. Essa linha também incorpora, indiretamente, a questão dos “entitlements”, porém, com a ótica voltada para os desastres naturais, sendo as abordagens risco-perigo (risk-hazard), ecologia humana e pressão e liberação as mais reconhecidas.

A abordagem risco-perigo se fundamenta nas percepções da escola de pensamento de perigos naturais, cuja veia positivista foca no estudo dos perigos como um estresse ambiental particular, sendo a vulnerabilidade uma função do risco de exposição (VINCENT, 2004). Nesse caso, a vulnerabilidade é decorrente de perturbações naturais que funcionam como fatores de risco biofísicos e irá depender do tipo e da magnitude do perigo, sendo a quantificação das perdas humanas um proxy da vulnerabilidade (BURTON; KATES; WHITE, 1993; FÜSSEL, 2007). A tradição do perigo natural argumenta que este é mediado pelas estruturas institucionais e que, por isso, seus impactos serão distintos sobre os diversos grupos populacionais (BURTON; KATES; WHITE, 1993). Um ponto-chave dessa abordagem é a diferenciação estrita entre o fator de perigo (“hazard”) – evento físico potencialmente danoso, fenômeno ou atividade humana que é caracterizado por sua localização, intensidade, frequência e probabilidade – e vulnerabilidade, que compreende uma relação entre a severidade do perigo e o grau de dano causado (FÜSSEL, 2007). Devido ao fato de a teoria risco-perigo considerar um evento perigoso como raro, conhecido e estável, sua utilização não é comum nos estudos de populações cuja exposição ao perigo depende de fatores socioeconômicos (FÜSSEL, 2007). Ao explicar a vulnerabilidade, majoritariamente, a partir de fatores técnicos, físicos e institucionais, esta linha teórica negligencia fortemente a

contribuição de outros fatores para a construção das vulnerabilidades e as coloca como o ponto final de uma sequência de análises linear e mandatória para a identificação dos ajustes necessários diante de uma ameaça (FEITOSA; MONTEIRO, 2012).

Por outro lado, a linha de pensamento da ecologia humana tem ênfase na vulnerabilidade de grupos ou unidades sociais expostas, especialmente no que se refere às estruturas e instituições que governam as vidas humanas (VINCENT, 2004). Esta tradição tenta explicar porque os pobres e marginalizados são também os mais susceptíveis aos perigos naturais, dado que o discurso do manejo do risco advogado pela teoria risco-perigo não conseguiu abarcar as causas políticas e estruturais da vulnerabilidade (ADGER, 2006; HEWITT, 1997; WATTS; BOHLE, 1993). A abordagem da ecologia humana enfatiza o papel do desenvolvimento econômico na adaptação ao risco e evidencia como os impactos serão diferentes a depender das estruturas de classe, governança e economia (ADGER, 2006; HEWITT, 1997).

Por fim, a linha pressão-liberação foi construída por BLAIKIE e cols. (1994) a partir das duas tradições anteriormente citadas (risco-perigo e ecologia humana) e define risco como um produto do perigo e da vulnerabilidade. Esse modelo parte do pressuposto de que um desastre é resultante da intersecção entre duas forças opostas – a exposição a uma ameaça biofísica e a existência de processos que geram vulnerabilidade e se acumulam progressivamente. Essas duas pressões culminam nos desastres e, como forma de reduzi-las, os autores sugerem intervenções nas causas de fundo – acesso ao poder, estruturas e recursos; nas pressões dinâmicas – urbanização, crescimento demográfico; e nas condições inseguras – contextos particulares de vulnerabilidade expressos no tempo e espaço (BLAIKIE et al., 1994). Embora seja aplicado em estudos de vulnerabilidade, o modelo de BLAIKIE e cols. (1994) não conceitua o termo vulnerabilidade.

Mais recentemente, as teorias da ecologia humana e do risco-perigo têm sido rearranjadas em novas abordagens integradas sistêmicas, como o modelo “*hazard-of-place*” e o quadro combinado de vulnerabilidade (CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003; CUTTER; MITCHELL; SCOTT, 2000; METZGER; LEEMANS; SCHRÖTER, 2005; TURNER et al., 2003). Essas novas abordagens enfatizam a vulnerabilidade de um sistema como o reflexo da exposição e da sensibilidade a perturbações, sejam elas naturais ou não, e de sua capacidade de responder, adaptar-se ou recuperar-se dos efeitos destas condições adversas. Nesse contexto, CUTTER (2003) define vulnerabilidade como a probabilidade de um indivíduo ou grupo ser exposto e afetado por um perigo, compreendendo assim a interação entre o perigo

local e o perfil social da população. Essa abordagem integrada de vulnerabilidade tem sido vastamente usada nos estudos de mudança ambiental global e mudança climática especialmente porque, nessas áreas, o termo vulnerabilidade tem sido amplamente aceito e usado como parte da agenda científica. Além disso, vulnerabilidade passa a ser compreendida como um processo e não o fim de um SSE dotado de interações complexas e não-lineares (FEITOSA; MONTEIRO, 2012; KELLY; ADGER, 2000).

A variedade de conceitos e abordagens para a vulnerabilidade evidenciada na figura 7 também é usada nas avaliações no âmbito das mudanças climáticas. O IPCC define vulnerabilidade como “a propensão ou predisposição a ser adversamente afetado, compreendendo a sensibilidade ou susceptibilidade ao dano e falta de capacidade para lidar ou se adaptar aos impactos” (IPCC, 2014a, p. 128). Nesse contexto, a vulnerabilidade ao clima apresenta três fundamentos básicos: exposição enquanto a natureza e o grau com que um sistema experimenta os estresses ambiental e sociopolítico; a sensibilidade como o grau com que o sistema é afetado ou modificado por perturbações; e capacidade adaptativa como a habilidade de um sistema evoluir para acomodar e lidar com os perigos ambientais ou mudanças políticas (ADGER, 2006).

Assim sendo, a vulnerabilidade e a exposição são dinâmicas e dependentes de fatores como economia, demografia, instituições e governança, assim como o são as populações e comunidades expostas de acordo com suas características – sexo, idade, renda, educação, dentre outros (MARENGO, 2014). A elevada vulnerabilidade e exposição são, portanto, resultado de processos de desenvolvimento falhos, como a má gestão do recurso natural, alterações demográficas, urbanização não planejada, insegurança alimentar, dentre outros (MARENGO, 2014). Diversos autores têm enfatizado que o termo vulnerabilidade só pode ser utilizado com algum significado se fizer menção a uma situação vulnerável específica (FÜSSEL, 2004; LUERS et al., 2003; METZGER; LEEMANS; SCHRÖTER, 2005). Como exemplos temos BROOKS (2003), para a qual só se pode falar significativamente sobre a vulnerabilidade de um sistema específico a um perigo também específico, e METZGER; LEEMANS & SCHRÖTER (2005), os quais especificam a vulnerabilidade de um ecossistema no que se refere a aspectos como localização, cenários de estresse e períodos de tempo. Sendo assim, Füssel (2007) sugere quatro dimensões básicas para descrever e delimitar uma situação de vulnerabilidade:



- Sistema: o sistema de análise pode ser uma população (ADGER, 1999, 2003), um SSE (BARATA; CONFALONIERI, 2011) ou qualquer outro sistema ameaçado por um perigo;
- Atributo: as características ou atributos mais importantes de um sistema vulnerável que estão ameaçados pela exposição a um perigo, como por exemplo, vidas humanas, saúde e biodiversidade;
- Fator de perigo: uma influência potencialmente danosa ao sistema analisado que pode afetar adversamente alguns atributos importantes do sistema;
- Referência temporal: período de tempo de interesse, o qual é particularmente importante quando o risco a que o sistema está sujeito pode se modificar ao longo do tempo.

#### **4.4 O USO DE INDICADORES COMO FERRAMENTA DE ESTUDO DA VULNERABILIDADE**

As avaliações da vulnerabilidade à mudança do clima têm o intuito principal de orientar as políticas públicas de adaptação para reduzir os riscos associados às alterações climáticas. A adaptação é uma das estratégias disponíveis para lidar com os riscos associados à mudança antropogênica do clima, sendo a outra alternativa as ações de mitigação. Enquanto a mitigação foca na redução da emissão dos GEE e no aprimoramento dos sumidouros desses gases, a adaptação tem como objetivo fundamental manejar os efeitos adversos da mudança climática através de intervenções nos sistemas vulneráveis, sejam esses naturais ou humanos (FÜSSEL; KLEIN, 2006).

O interesse crescente nas questões relacionadas à mudança climática e seus impactos associados tem aberto espaço para as avaliações de vulnerabilidade, cuja finalidade principal é analisar os fatores socioeconômicos e institucionais e, em menor extensão, fatores políticos, ecológicos e culturais, que determinam como as populações respondem e lidam com os perigos climáticos (ADGER et al., 2004). Nesse sentido, os estudos de vulnerabilidade compreendem um passo no escopo das estratégias de adaptação, as quais constituem um ciclo de etapas composto por 1) avaliação dos impactos, 2) monitoramento dos impactos, 3) avaliação da vulnerabilidade, 4) propostas de adaptação e 5) monitoramento e avaliação das ações propostas.

A adaptação eficiente às alterações climáticas depende da disponibilidade de dois pré-requisitos importantes: informações sobre o que precisa ser adaptado e como ser adaptado, e

recursos para implementar as ações adaptativas (FÜSSEL; KLEIN, 2006). Nesse sentido, um dos pontos imprescindíveis é a coleta de informações sobre o sistema vulnerável e suas exposições. Isso permite a agregação de alguns componentes essenciais capazes de indicar o dano potencial pela ação do clima, assim como a capacidade de adaptação do grupo social afetado.

Nos estudos de vulnerabilidade, indicadores são ferramentas comumente usadas para avaliar a vulnerabilidade e compará-la entre os diversos sistemas estudados. HINKEL (2011) argumenta que quando se trata de vulnerabilidade, é impossível definir uma medida, pois a mesma compreende um conceito teórico não observável. O autor defende que o ideal é usar o termo operacionalização, caracterizado como a construção de um método capaz de mapear a vulnerabilidade, um conceito teórico, em algo observável (MOSS; BRENKERT; MALONE, 2001; PATT et al., 2009). Nesse caso, se fala em metodologia de avaliação da vulnerabilidade, na qual os indicadores operacionalizam o conceito de vulnerabilidade em uma função simples e linear (HINKEL, 2011). Assim, a partir de um modelo conceitual coerente à realidade estudada, um conjunto amplo de informações e indicadores vem sendo usados para avaliar os impactos da mudança climática, a exemplo de BROOKS; ADGER & KELLY (2005), que definiram onze indicadores chave para avaliar a vulnerabilidade e a capacidade adaptativa no nível nacional englobando aspectos como saúde, educação, geografia e ecologia; e MOSS; BRENKERT & MALONE (2001), que utilizaram variáveis de setores distintos como infraestrutura, economia e saúde para construir seu índice de vulnerabilidade.

Um indicador é definido como uma medida qualitativa ou quantitativa de um conjunto de variáveis capaz de fornecer informações relevantes sobre um fenômeno, ambiente ou área (OECD; EUROPEAN UNION; JOINT RESEARCH CENTRE, 2008). Ele é capaz de informar sobre o progresso em direção a uma determinada meta, sendo utilizado como recurso para deixar mais perceptível uma tendência ou fenômeno não imediatamente detectável através dos dados isolados (VAN BELLEN, 2005). São descritos como algo que fornece uma pista para um assunto ou torna perceptível uma tendência ou processo que não é imediatamente detectável. Além disso, um indicador não é um elemento explicativo ou descritivo, mas uma informação pontual no tempo e no espaço, cuja integração e evolução permite o acompanhamento dinâmico da realidade (SOBRAL; DE FREITAS, 2010). Portanto, o significado de um indicador se estende, além do que é de fato medido, para um

alcance maior do fenômeno de interesse, sendo capaz de encapsular uma realidade complexa em um construto único (MORAES, 2011; VINCENT, 2004).

Devido à natureza multidimensional da vulnerabilidade, em muitos estudos são usados indicadores compostos, caracterizados como um compilado de indicadores individuais em um índice e baseados em um modelo conceitual básico (OECD; EUROPEAN UNION; JOINT RESEARCH CENTRE, 2008). Sendo assim, um indicador composto é a representação unidimensional de um conceito multidimensional através de um índice simples (SCHUSCHNY; SOTO, 2009). Indicadores compostos são muitas vezes utilizados para fazer comparações sobre o desempenho das unidades de análise a partir do qual são calculados, facilitando a interpretação dos cenários a serem considerados pelos tomadores de decisão e funcionando como uma ferramenta útil para avaliar o desempenho dos sistemas estudados (SCHUSCHNY; SOTO, 2009). Esses instrumentos são apresentados como facilitadores para o atendimento das demandas de informação para formulação de políticas e para a tomada de decisões nas esferas públicas, assim como para a disseminação da cultura de uso de indicadores nas agendas de políticas públicas (SCHUMANN; MOURA, 2015). Um exemplo conceituado de indicador composto é o Índice de Desenvolvimento Humano das Nações Unidas, o qual agrega as dimensões de renda, educação e expectativa de vida para formar um índice anual que compara o desenvolvimento dos países e aponta necessidades de assistência humanitária.

Embora de grande utilidade prática, o processo de construção dos indicadores compostos exige grande embasamento teórico, transparência e objetividade para não incorrer em más interpretações e falta de comparabilidade entre as unidades de análise. De acordo com (SCHUSCHNY; SOTO, 2009), um indicador composto exige duas características básicas 1) a definição clara do atributo a ser medido e 2) a existência de informação confiável para construir a métrica desejada. Isso porque a concepção do indicador deve ser feita a partir de um conjunto de informações "mensuráveis", isto é, os dados utilizados devem estar amplamente disponíveis. Além disso, ressalta-se que o desenho de um indicador composto deve ser orientado por uma demanda potencial, motivo pelo qual durante sua construção é imprescindível a participação de especialistas e dos atores sociais envolvidos. Essa postura agrega confiabilidade aos índices, cuja transparência no processo de desenvolvimento e aplicabilidade é considerada peça fundamental da metodologia. A "*Organisation for Economic Co-operation and Development*" (OECD), em seu Manual de Indicadores Compostos (2008), listou algumas vantagens inerentes à metodologia dos indicadores

compostos, sendo algumas delas a capacidade de simplificar uma realidade complexa e a facilidade de interpretação.

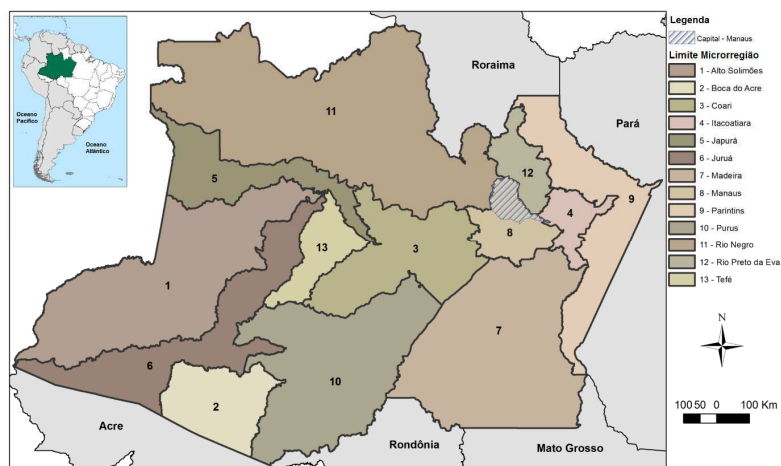
Baseado nessas exigências, a escolha dos indicadores adequados irá depender do modelo conceitual adotado; se há um embasamento teórico que estabelece a relação entre as variáveis desejadas, a abordagem de escolha é dita dedutiva; se a escolha dos indicadores se fundamenta na significância estatística das variáveis envolvidas, a abordagem é nomeada indutiva (ADGER et al., 2004). Entretanto, muitos estudos de vulnerabilidade não pertencem nem à abordagem indutiva nem à dedutiva de escolha dos indicadores, sendo estes selecionados com base em como eles se inserem nos componentes da vulnerabilidade – sensibilidade, exposição e capacidade adaptativa (ADGER et al., 2004).

Outro aspecto importante nas avaliações de vulnerabilidade por indicadores compostos consiste na forma de agrupar os sub indicadores. Alguns autores consideram que os sub indicadores que compõem os índices devem estar relacionados entre si; outros advogam que os indicadores compostos resumem vários e diferentes aspectos de um fenômeno e que, por isso, não necessitam estar relacionados entre si (SATURNO, 2004). Estas abordagens correspondem, respectivamente, ao modelo “Reflexivo” e “Formativo” de construção de índices de vulnerabilidade às mudanças climáticas, ou seja, com e sem exigência de uma relação interna entre os seus componentes.

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 ÁREA DE ESTUDO

O estado do Amazonas está localizado na Região Norte do Brasil e é o maior estado do país, ocupando cerca de 18% de seu território, cerca de 1.559.161,682 km<sup>2</sup>. Limita-se com os Estados brasileiros do Acre, Pará, Rondônia, Roraima e Mato Grosso, e com os seguintes países: Venezuela, Peru e Colômbia. Oficialmente, o Amazonas é dividido em 4 mesorregiões (Centro Amazonense, Sul Amazonense, Sudoeste Amazonense e Norte Amazonense) e treze microrregiões (Alto Solimões, Boca do Acre, Coari, Itacoatiara, Japurá, Juruá, Madeira, Manaus, Parintins, Purus, Rio Negro, Rio Preto da Eva e Tefé) (Figura 8).



**Figura 8.** Microrregiões do Amazonas e a localização da capital, Manaus, mostrada no polígono rachurado.

Seus 62 municípios abrigam 4.001.667 habitantes, sendo 52% residentes na capital, Manaus, considerada um centro histórico e portuário do estado. Por esse motivo, Manaus é a cidade mais populosa da Amazônia Brasileira. A população é majoritariamente urbana, embora exista um considerável contingente de populações denominadas rurais que são, acima de tudo, grupos tradicionais do estado: os índios, que residem principalmente em terras indígenas; e os ribeirinhos, que incorporam um critério geográfico representado por lagos e

rios (ALMEIDA, 2004). A maior parte da população amazonense é parda (68,8%), recebe até ½ salário mínimo (56,1%), e vive em domicílios com saneamento precário (IBGE, 2010).

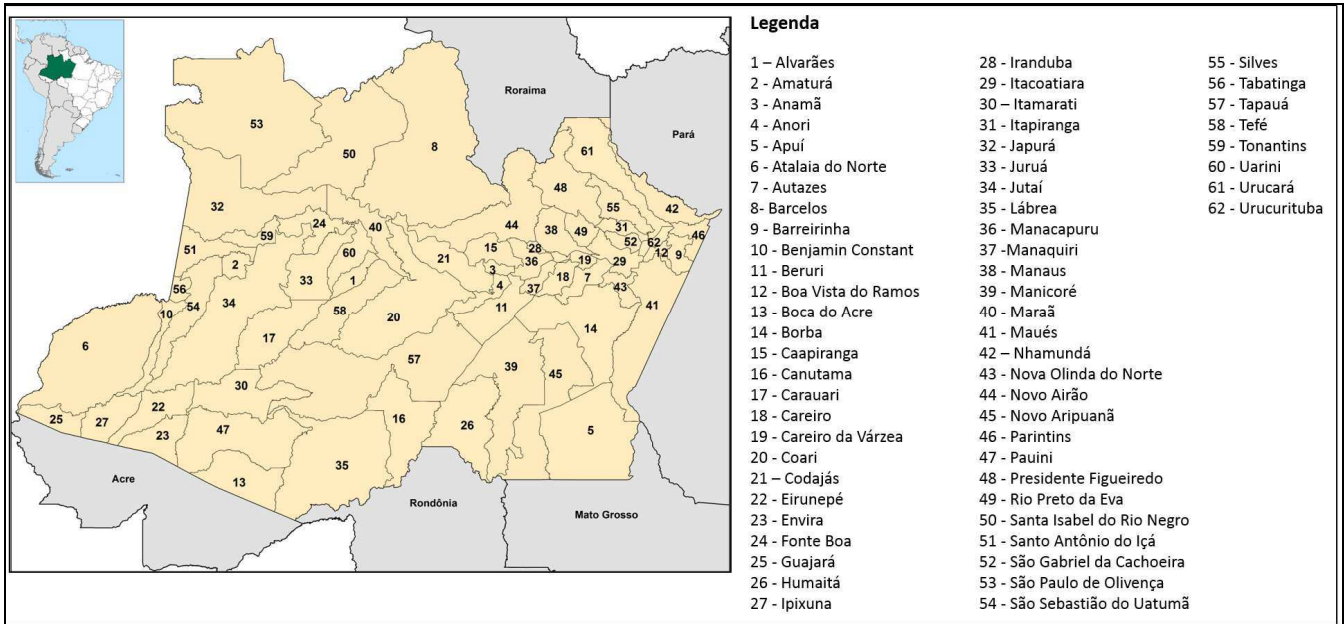


Figura 9. Municípios do estado do Amazonas.

No aspecto ambiental, o estado é considerado pouco desmatado, possuindo 23,5% do ecossistema protegido em unidades de conservação e cerca de 98% do território preservado. Porém, ainda existem regiões historicamente ligadas ao desmatamento, principalmente na região sul, impulsionado pelas ondas de desenvolvimento econômico do ciclo da borracha, do período militar e, mais recentemente, dos empreendimentos energéticos e das atividades agroflorestais (PRATES; BACHA, 2011; SAMPAIO et al., 2015). A fitofisionomia varia entre cerrado e florestas densas, o tipo predominante é a Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas (40%), seguida da Floresta Ombrófila Aberta de Terras Baixas (14%) e do Contato Campinarana-Floresta Ombrófila (13%) (CEPAL, 2007). Durante o período de cheia, as águas inundam as margens dos rios, avançam pela floresta e chegam quase a alcançar as copas das árvores, formando os "igapós" – áreas permanentemente inundadas durante as cheias.

A Amazônia possui a maior bacia hidrográfica do mundo devido à influência de fatores como precipitação, vegetação e altitude, estendendo-se por 3.889.489,6 km<sup>2</sup>. Nesse aspecto, o estado do Amazonas é essencialmente fluvial, sendo a mobilidade de bens e pessoas dependente dos rios. São mais de 20 mil km de vias fluviais navegáveis ligando comunidades distantes na região, o que torna a acessibilidade do contexto físico do Estado a menor da Região Norte (CEPAL, 2007). Além dos rios Amazonas, Negro e Solimões, outros rios principais são: Madeira, Purus, Juruá, Uatumã, Içá, Japurá e Uaiupés, todos integrantes da Bacia Amazônica. Por terra, a rodovia Transamazônica corta transversalmente parte do sul do Estado, vindo do estado do Pará, enquanto as estradas BR-319 (Manaus a Porto Velho) e BR-174 (Manaus a Boa Vista) permitem o fluxo do sudeste ao nordeste, mas o centro e o oeste do estado ainda são praticamente inacessíveis por terra (CEPAL, 2007).

O clima é equatorial úmido, com temperatura média/dia/anual de 26,7°C, havendo variações médias entre 23,3°C e 31,4°C (CEPAL, 2007). A umidade relativa do ar fica em torno de 80% e o Estado possui apenas duas estações bem definidas: chuvosa (inverno) e seca ou menos chuvosa (verão). A região amazônica possui uma precipitação média de aproximadamente 2300 mm/ano, embora existam regiões (na fronteira entre Brasil e Colômbia e Venezuela) em que o total anual atinge 3500 mm (FISCH; MARENGO; NOBRE, 1996).

A economia do Amazonas baseia-se principalmente no setor primário, em atividades de extrativismo, mineração e pesca. Em Manaus concentram-se o setor industrial e o de serviços. A produção industrial recebeu significativo impulso a partir de 1967, quando foi criada a

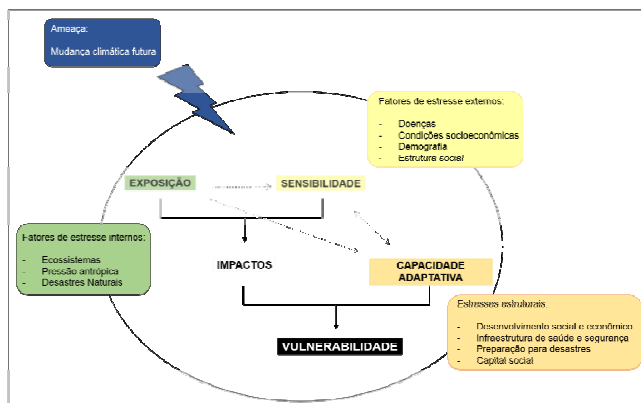


Zona Franca comercial e industrial de Manaus, com o objetivo de promover o desenvolvimento da região a partir da produção de materiais elétricos e de comunicação.

## 5.2 MODELO CONCEITUAL DO ESTUDO

O modelo conceitual é parte fundamental da análise de vulnerabilidade pois ilustra os conceitos importantes do problema e a associação existente entre seus componentes. O cerne do presente modelo foi a definição de vulnerabilidade de contexto, definida pelo 5º Relatório do IPCC como “a inabilidade presente de lidar com as pressões externas ou mudanças do clima, sendo uma característica do sistema social e ecológico gerada por múltiplos fatores e processos”. Os múltiplos fatores e processos considerados abarcaram os componentes clássicos da vulnerabilidade humana ao clima: exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa.

Sendo assim, para a construção do modelo foi considerando que, em cada local, as populações estão sujeitas a tensões múltiplas e específicas que se relacionam para determinar os impactos do clima no âmbito regional. Nesse sentido, o presente estudo construiu um modelo conceitual para os municípios amazonenses considerando que o SSE apresenta determinadas características próprias que determinam um perfil de vulnerabilidade, o qual pode ser exacerbado por um fator de perigo – a mudança do clima (Figura 10).



**Figura 10.** Modelo conceitual ilustrando a relação entre a vulnerabilidade e seus componentes. O círculo representa o município onde as muitas condições de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa determinam o perfil de vulnerabilidade da população. As caixas exemplificam algumas dessas condições consideradas críticas para cada componente: a caixa verde está relacionada à exposição, a amarela à sensibilidade e a laranja à capacidade adaptativa. O risco climático está representado pela mudança climática futura. Adaptado: ALLEN CONSULTING GROUP (2005).

O círculo representa o SSE, no caso o município, no qual as inúmeras condições físicas, naturais, econômicas, sociais, políticas e estruturais moldam o perfil de vulnerabilidade da população. Esse perfil é, em parte, determinado pela exposição e a sensibilidade, uma vez que esses dois componentes contribuem para definir a magnitude dos possíveis impactos da mudança futura do clima. A magnitude dos impactos pode ser maior ou menor a depender da capacidade da população e do município de lidar com as consequências adversas do clima. A capacidade adaptativa está estritamente ligada à sensibilidade do sistema, uma vez que este componente abarca determinadas características intrínsecas à população que determinam sua habilidade de se recuperar dos impactos. O perfil de vulnerabilidade construído, então, pode ser alterado pela influência de um perigo climático, aqui representado pela mudança do clima futuro para o período de 2041-2070.

### **5.3 HISTÓRICO DA CONSTRUÇÃO DO MODELO CONCEITUAL: A COOPERAÇÃO FIOCRUZ E MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE**

O arcabouço conceitual do modelo que baliza os indicadores escolhidos para a análise da vulnerabilidade mostrada no presente trabalho, foi estabelecido a partir da contratação da Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ) pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), em 2013. O MMA e o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), através do Grupo Executivo do Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima, coordenam o Grupo de Trabalho Adaptação (GT Adaptação). Um dos objetivos principais do GT Adaptação é elaborar o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA). Nesse contexto, o GT Adaptação deve subsidiar o desenvolvimento de um sistema de indicadores para monitoramento de parte das ações do PNA como, por exemplo, a identificação e construção de indicadores de vulnerabilidade social para monitoramento das ações de adaptação à mudança do clima no Brasil.

A partir da cooperação técnica entre a FIOCRUZ e o MMA/MCTI em 2014, foi proposto o projeto “Modelo Conceitual para avaliação municipal da vulnerabilidade humana à mudança do clima no Brasil: contribuição da FIOCRUZ ao Plano Nacional de Adaptação”. O objetivo do projeto é subsidiar o PNA na identificação de populações e territórios vulneráveis à mudança do clima no Brasil, através do desenvolvimento de um modelo conceitual e de uma ferramenta de avaliação da vulnerabilidade – um conjunto de indicadores socioambientais – tendo como unidade de análise os municípios brasileiros. A primeira fase do projeto compreendeu o desenvolvimento teórico do sistema de indicadores, tendo sido a proposta

metodológica inicial apresentada pelas equipes da Fiocruz do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte, em 2014. A proposta metodológica foi aprimorada em 2015, através de um painel de especialistas acadêmicos e institucionais de todo o país, formado para o seminário “Indicadores Subnacionais de Vulnerabilidade da População à Mudança do Clima no Brasil”, ocorrido em março de 2015, em Brasília. Assim, foi definida uma estrutura mestra de indicadores, embora passível de modificações para abarcar as condições de vulnerabilidade (climáticas, sociais, ambientais, etc) distintas nas várias regiões brasileiras.

Dentre as fases posteriores do projeto, estava prevista a aplicação do sistema de indicadores em um estado piloto (Espírito Santo) para a validação da metodologia e a aplicação da metodologia escolhida em mais cinco estados brasileiros (Amazonas, Maranhão, Mato Grosso do Sul, Paraná e Pernambuco). Dessa forma, o presente trabalho se insere em um contexto maior de estudos de vulnerabilidade no âmbito nacional e tem seu modelo conceitual e metodologia derivados da proposta inicial de indicadores que vem sendo aprimorada ao longo do desenvolvimento da cooperação técnica FIOCRUZ/MMA, guardadas as devidas alterações para a realidade social, ambiental, econômica e territorial do Amazonas.

#### **5.4 VARIÁVEIS DO MODELO**

As variáveis constituintes do modelo foram escolhidas de acordo com duas características básicas 1) ser, em sua maior parte, de livre acesso ao público e 2) ser atualizada sistematicamente. A maior parte dessas variáveis se baseou no “background” estabelecido por outros trabalhos desenvolvidos no contexto brasileiro, enquanto outras variáveis foram propostas especificamente para serem inseridas no presente trabalho; todas passaram pela validação de um painel de especialistas (BARATA; CONFALONIERI, 2011; CONFALONIERI; MARINHO; RODRIGUEZ, 2009; CONFALONIERI; QUINTÃO; BRITO, 2016; QUINTÃO et al., 2017).

No quesito exposição foram considerados componentes ambientais do sistema - a extensão de cobertura vegetal e o desmatamento acumulado – assim como a ocorrência de desastres naturais. Na sensibilidade foram avaliadas a morbidade das doenças sensíveis ao clima e as características inerentes à população, como pobreza e demografia. Por fim, na capacidade adaptativa foram estudados aspectos físicos e organizacionais do SSE, como infraestrutura de saúde. A esses componentes foi agregada uma ameaça, representada pelas anomalias de parâmetros climáticos de precipitação e temperatura projetadas pelo modelo ETA-HadGEM2-ES para o período 2041-2070.

## 5.5 CONSTRUÇÃO DO CENÁRIO CLIMÁTICO

A partir de bases de dados digitais especializados, disponíveis em Sistemas de Informação Geográfica, dados climáticos de temperatura e precipitação foram processados para gerar mapas de anomalias climáticas para todos os municípios do estado do Amazonas. Os dados climáticos foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e corresponderam à saída do modelo climático Eta/HadGem2-ES para temperatura (máxima e mínima – média diária em graus Celsius) e precipitação (precipitação máxima acumulada em 5 dias consecutivos – Rx5day; número máximo de dias em que a precipitação diária foi < 1mm (CDD), precipitação total anual diária > 95p (R95p) e precipitação total anual nos dias úmidos (PRCPTOT)).

O modelo climático Eta/HadGem2-ES correspondeu ao modelo regionalizado (Eta) aninhado ao modelo global HadGem-ES e apresentou grid horizontal de 20km para a maior parte da América do Sul. O modelo Eta regionalizado mostra forte concordância com os dados observacionais de precipitação para a América do Sul e, assim, pode ser usado em estudos de mudança do clima para o território Brasileiro (LUIGGI, 2014).

As variáveis climáticas foram representadas pelas anomalias climáticas – diferença absoluta entre o período futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990). Os “*Representative Concentration Pathways*” (RCP) adotados foram o RCP 8.5 – forçante radiativa acima de 8,5 W/m<sup>2</sup> e concentração de CO<sub>2</sub> de 1.370 ppm – e o RCP 4.5, que considera um cenário de forçante radiativa de até 4,5 W/m<sup>2</sup> e concentração de CO<sub>2</sub> de até 650 ppm, ambos até o final do século XXI. Para a análise espacial das variáveis climáticas foi usada modelagem geoestatística através da ferramenta “*Geostatistical Analyst*” do software ArcGis, versão 10.2.2, e Surfer, versão 11. Os dados foram interpolados para estimar valores das variáveis climáticas para locais que não estavam disponíveis na base de dados.

## 5.6 CÁLCULO DO ÍNDICE MUNICIPAL DE VULNERABILIDADE

Para medir a vulnerabilidade dos municípios, foi utilizada a abordagem dos índices sintéticos, metodologia aplicada de maneiras distintas por diversos autores, quer em escala nacional ou regional (BARATA; CONFALONIERI, 2011; BROOKS; ADGER; KELLY, 2005; CONFALONIERI; MARINHO; RODRIGUEZ, 2009; CONFALONIERI; QUINTÃO; BRITO, 2016; CUTTER; MITCHELL; SCOTT, 2000; DERESSA; HASSAN; RINGLER, 2008; MOSS; BRENKERT; MALONE, 2001; QUINTÃO et al., 2017; YUSUF;

FRANCISCO, 2009).O método se baseia na seleção de alguns indicadores a partir de um conjunto potencial de variáveis, que são, então, sistematicamente combinados para gerar níveis de vulnerabilidade (DERESSA; HASSAN; RINGLER, 2008). De acordo com SABELLI (2011), que revisou a literatura referente às avaliações de vulnerabilidade ao clima baseadas em indicadores para a América Latina, essa abordagem é recomendada em detrimento da simulações de modelagem pois 1) os resultados alcançados são similares, e 2) para muitos países em desenvolvimento, como o Brasil, os requisitos técnicos, a disponibilidade de dados e de recursos financeiros necessários para conduzir as avaliações de modelagem são escassos ou inexistentes. Assim, para o cálculo da vulnerabilidade no presente trabalho, foi assumido que todos os indicadores apresentam igual importância e, portanto, recebem todos o mesmo peso (CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003; CUTTER; MITCHELL; SCOTT, 2000). A escala de análise escolhida foi municipal.

O presente estudo construiu um Índice Municipal de Vulnerabilidade (IMV) para os municípios do estado do Amazonas a partir da agregação sucessiva de indicadores e índices. Os índices construídos foram agregados seguindo o raciocínio dos componentes fundamentais da vulnerabilidade, da seguinte forma:

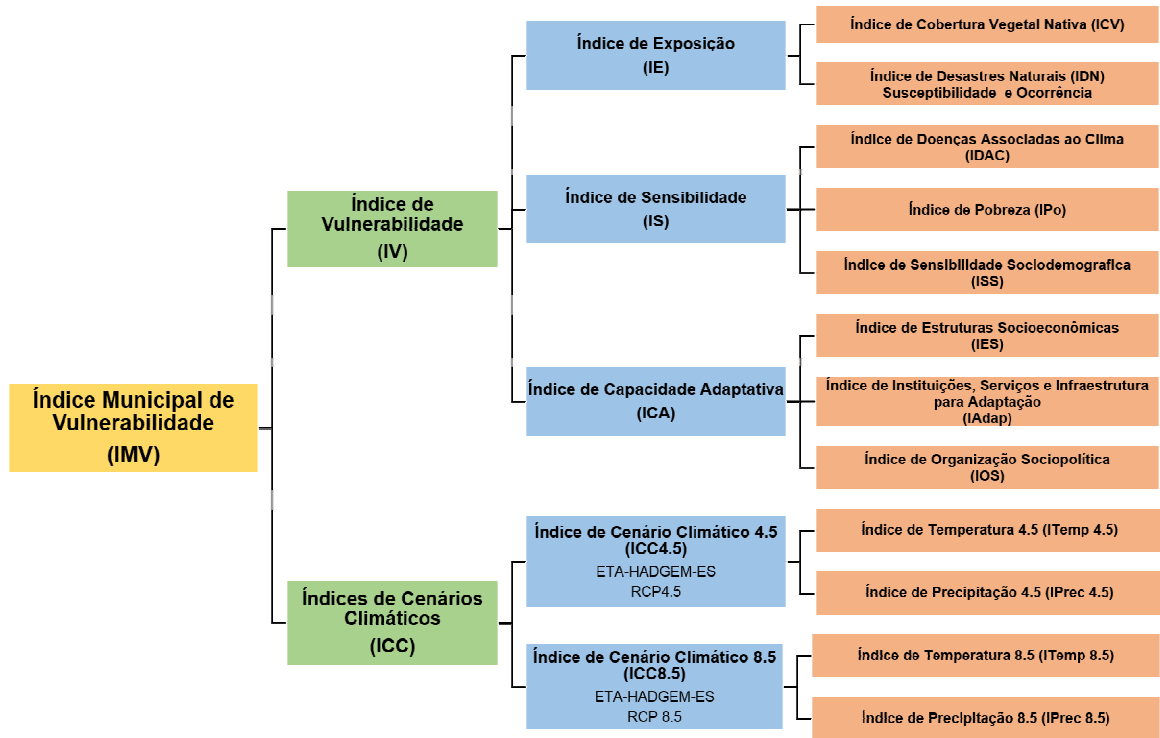
(Equação 1.0)

$$\textit{Vulnerabilidade} = \textit{Exposição} + \textit{Sensibilidade} + \textit{Capacidade Adaptativa}$$

Nos estudos clássicos de vulnerabilidade, é considerado que a exposição e a sensibilidade podem elevar a vulnerabilidade do SSE, enquanto a capacidade adaptativa pode reduzi-la. Nesses estudos, a equação mostrada acima assume outra lógica – a capacidade adaptativa recebe sinal negativo, evidenciando que a introdução desse componente diminui a vulnerabilidade. O presente trabalho também considerou a mesma relação dos componentes exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa com a vulnerabilidade, porém, como pode ser visto na equação 1.0, a capacidade adaptativa recebeu sinal positivo. Isso ocorreu para facilitar a interpretação da informação, por parte dos gestores, durante a etapa de atribuição de notas às variáveis que compuseram o índice de capacidade adaptativa. Assim, todas as notas atribuídas aos indicadores que compuseram a exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa seguiram o mesmo raciocínio – se a característica analisada conferia vantagem ao município, o mesmo recebia notas mais baixas que indicavam menor vulnerabilidade; ao passo que características desvantajosas conferiam ao município notas maiores, de maior

vulnerabilidade. Se a lógica tradicional tivesse sido adotada, a forma de raciocinar a atribuição de notas para o índice de capacidade adaptativa deveria ser inversa à lógica adotada para as notas da exposição e da sensibilidade, podendo gerar confusão para os gestores. Dessa forma, pode-se considerar que as variáveis da capacidade adaptativa reduzem a vulnerabilidade da mesma forma como nos estudos clássicos, pois o conceito desse componente é mantido em sua essência, havendo uma inversão do raciocínio apenas na etapa de atribuição de notas. Logo, para os índices de capacidade adaptativa, os maiores valores representaram os municípios mais vulneráveis (menos adaptados); enquanto os menores valores representaram os municípios menos vulneráveis (mais adaptados).

A figura 11 mostra, de forma desagregada, como os índices constituintes do IMV estão relacionados. O IMV representa, sinteticamente, a relação entre a vulnerabilidade observada no presente e as alterações do clima futuro em uma gradação entre 0 e 1 – 0 representa a menor e 1 a maior vulnerabilidade observada entre os municípios avaliados.



**Figura 11.** Diagrama metodológico mostrando como os índices municipais desenvolvidos foram organizados para gerar o Índice de Vulnerabilidade Municipal considerando ambos os cenários de emissão otimista (RCP 4.5) e pessimista (RCP 8.5).

O cálculo do IMV apresentou duas etapas distintas. A primeira foi a de atribuição de notas gradativas, representando a vulnerabilidade, para cada indicador. A segunda etapa consistiu na realização de médias aritméticas das notas atribuídas aos indicadores para a formação dos índices.

Na atribuição de notas, o primeiro passo foi a divisão de cada indicador municipal em grupos, de forma que cada grupo de municípios pudesse receber uma nota gradativa de vulnerabilidade. A divisão da informação foi feita por percentis, sendo que cada intervalo de percentil recebeu um valor entre 0 e 4. A nota 0 foi atribuída ao grupo de municípios considerado menos vulnerável no quesito avaliado e 4 atribuída ao grupo de municípios considerado mais vulnerável, conforme raciocínio explicitado nas etapas seguintes referentes à descrição e cálculo dos indicadores.

Atribuídas as notas, em seguida foi realizado o cálculo dos índices, que podem ser observados de maneira sintética também nas caixas de cor rosa do diagrama metodológico (Figura 10). O cálculo se baseou na média aritmética das notas atribuídas aos indicadores municipais que constituíam cada índice. Posteriormente, foi feita uma padronização para que o valor obtido variasse sempre em uma escala entre 0 e 1, como na seguinte fórmula:

(Equação 1.1)

$$\text{Índice}_p = \frac{(\text{Índice}_{obs} - \text{Menor índice})}{(\text{Maior índice} - \text{Menor índice})}$$

Sendo:

Índice p = índice padronizado;

Índice<sub>obs</sub> = valor do índice calculado (para cada município);

Menor índice = valor mínimo do índice observado entre todos os municípios;

Maior índice = valor máximo do índice observado entre todos os municípios.

O mesmo procedimento de média aritmética e padronização foi utilizado para calcular e agregar todos os índices do esquema metodológico. Ao final, o índice desenvolvido – IMV – resultou em uma medida relativa de vulnerabilidade municipal variando entre 0 e 1. Essa medida teve o papel principal de servir à comparação entre os municípios, permitindo “ranqueá-los” de acordo com suas vulnerabilidades observadas. Para todos os índices, os



intervalos entre 0 e 1 corresponderam a: 0 a 0,2 (baixo); 0,201 a 0,400 (médio-baixo); 0,401 a 0,6 (médio); 0,601 a 0,8 (médio alto) e 0,801 a 1 (alto).

## **5.7 FONTE DOS DADOS**

Dados socioeconômicos, ambientais, de infraestrutura e de projeções climáticas foram coletados para os 62 municípios do Amazonas. As informações sobre a população e infraestrutura dos municípios foram obtidas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), do Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal, e do Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS). Os dados ambientais foram coletados a partir do Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES), vinculado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. As informações referentes aos desastres naturais foram retiradas do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, da Agência Nacional de Águas e da Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais. Por fim, as informações climáticas foram obtidas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

## **5.8 COMPONENTES DO ÍNDICE MUNICIPAL DE VULNERABILIDADE**

Essa seção apresenta e detalha a construção dos índices utilizados para compor o Índice Municipal de Vulnerabilidade (IMV) assim como seus sub-índices. Uma visão resumida do conteúdo dessa seção, mostrando os cálculos e a relação da cada índice com a vulnerabilidade pode ser observada no quadro 1.

### **5.8.1 Índice de exposição (IE)**

De acordo com o IPCC exposição pode ser definida como “a presença de pessoas, meios de subsistência, espécies e ecossistemas, funções ambientais, recursos, infraestrutura ou ativos econômicos, sociais e culturais em locais que podem ser adversamente afetados” (IPCC, 2014b). A exposição, enquanto subcomponente da vulnerabilidade é capaz de tornar territórios e populações mais propensas a serem afetados pelos impactos climáticos. De maneira geral, tanto a exposição quanto a vulnerabilidade são influenciadas por múltiplos fatores e o risco apresentado pela mudança do clima poderá se concretizar em impactos mais ou menos severos a depender das características dos SSE.

**Quadro 1.** Índices que compõem o Índice Municipal de vulnerabilidade, seu cálculo, breve descrição e sua relação com a vulnerabilidade.

COMPONENTE DO IMV	ÍNDICE E CÁLCULO	DESCRIÇÃO DOS INDICADORES	RELAÇÃO COM A VULNERABILIDADE
ÍNDICE DE EXPOSIÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Índice de Cobertura Vegetal e Desmatamento (ICVD) <math>ICVD = (Nota\ cobertura\ vegetal + Nota\ desmatamento) / 2</math></li> </ul>	<b>Cobertura vegetal nativa:</b> percentual da área do município que é coberta por vegetação nativa. Proxy de serviços ecossistêmicos.	Quanto maior a cobertura, menor a exposição/vulnerabilidade.
		<b>Desmatamento acumulado:</b> percentual da área de vegetação nativa original desmatada entre 2000 e 2013. Indicativo da pressão antrópica sobre a floresta.	Quanto maior o desmatamento acumulado para a série histórica, maior a exposição/vulnerabilidade.
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Índice de Desastres Naturais (IDN) <math>IDN = (ISDN + IODN) / 2</math></li> <li>• Índice de Susceptibilidade a Desastres Naturais (ISDN) <math>ISDN = (Nota\ população\ em\ risco + Nota\ CDD) / 2</math></li> <li>• Índice de Ocorrência de Desastres Naturais (IODN) <math>IODN = (Nota\ ocorrência\ desastres + Nota\ óbitos\ relacionados\ a\ desastres) / 2</math></li> </ul>	<b>População em risco:</b> percentual do total da população vivendo em área de alto e muito alto risco para deslizamentos e eventos hidrológicos. Sugestivo das perdas humanas que podem resultar dos desastres.	Quanto maior o percentual de população em risco, mais exposto vulnerável.
		<b>Consecutive dry days (CDD):</b> parâmetro climático que indica maior propensão a períodos secos.	Quanto maior o CDD médio, mais exposto / vulnerável.
		<b>Ocorrência de desastres entre 1991-2012:</b> percentual de eventos ocorridos no município em relação a todos os eventos ocorridos no estado. Foi usado como uma indicação do peso dos desastres em cada cidade.	Quanto maior a proporção de eventos do município em relação ao estado, mais exposto / vulnerável.
		<b>Óbitos relacionados aos desastres:</b> a proporção de óbitos reportados no município em relação ao total de eventos no município. Foi usado como uma indicação da fatalidade dos eventos.	Quanto maior a proporção de óbitos, mais exposto/vulnerável.

<b>ÍNDICE DE SENSIBILIDADE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Índice de Doenças Associadas ao Clima (IDAC):</b> Dengue; Malária; Leishmaniose Tegumentar; Acidentes por Animais Peçonhentos (aranhas, escorpiões e serpentes)</li> </ul> <p><i>IDAC = (Nota da proporção de casos + Nota da incidência + Nota tendência da taxa de incidência) / 3</i></p>	<p><b>Proporção de casos da doença:</b> casos ocorridos no município em relação ao total de número de casos ocorridos no estado durante a série histórica.</p>	Quanto maior a proporção de casos, mais sensível/ vulnerável.
		<p><b>Taxa de incidência:</b> a incidência média foi usada para medir o risco da doença durante a série histórica.</p>	Quanto maior a incidência média, mais sensível/ vulnerável.
		<p><b>Tendência da taxa de incidência:</b> a taxa de incidência foi usada para conhecer o comportamento da doença durante a série histórica, se negativo, positivo ou neutro.</p>	Se a doença mostrou tendência de declínio, o município foi considerado menos sensível. Se a tendência foi de aumento, a cidade foi considerada mais sensível.
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Índice de Pobreza (IPo)</b></li> </ul> <p><i>IPo = (Nota probabilidade morrer antes dos 40 anos + Nota analfabetismo + Nota saneamento + Nota mortalidade infantil + Nota renda) / 5</i></p>	<p><b>Probabilidade de morrer antes dos 40 anos:</b> Reflete as condições de vida e padrão de mortalidade da população.</p>	Quanto maior a probabilidade de morrer antes dos 40 anos, mais sensível..
		<p><b>Percentual da população acima de 25 anos analfabeta:</b> razão entre a população de 25 anos ou mais que não sabe ler ou escrever e o número de pessoas na mesma faixa etária. A taxa de analfabetismo foi considerada um proxy do nível educacional e das habilidades da população.</p>	Quanto maior a taxa de analfabetismo, mais sensível/ vulnerável.
		<p><b>Percentual de domicílios com saneamento inadequado:</b> domicílios com saneamento considerado inadequado para esgotamento sanitário, água encanada e coleta de lixo. Considerada uma necessidade básica, está relacionada com as condições de saúde da população.</p>	Quanto maior o percentual de domicílios sem saneamento, mais sensível..

<p>• <b>Índice de Sensibilidade Sociodemográfica (ISS)</b>  <math>ISS = (ISS\ presente + ISS\ futuro) / 2</math></p> <p>• <b>ISS presente:</b>  <math>ISS\ presente = (Nota\ mulheres\ chefes\ de\ família + Nota\ chefes\ de\ família\ jovens + Nota\ população\ infantil + Nota\ população\ idosa + Nota\ população\ com\ deficiência + Nota\ população\ ribeirinha) / 6</math></p> <p>• <b>ISS futuro:</b>  <math>ISS\ futuro = (Nota\ população\ infantil + Nota\ população\ idosa) / 2</math></p>		<p><b>Probabilidade de morrer antes dos 5 anos a cada 1.000 nascidos vivos:</b> reflete os padrões de vida e saúde da população.</p>	<p>Quanto maior a probabilidade de morrer antes dos 5 anos, maior a sensibilidade/vulnerabilidade.</p>
		<p><b>Percentual de domicílios com renda abaixo da pobreza:</b> domicílios em que a renda nominal per capita foi de até ½ salário mínimo. Medida monetária da pobreza.</p>	<p>Quanto maior o percentual de domicílios com renda até ½ salário, mais sensível/vulnerável.</p>
		<p><b>Percentual de mulheres chefes de família com ensino fundamental incompleto ou sem instrução:</b> percentual do total de domicílios. Indicativo de inequidades econômicas e de gênero.</p>	<p>Quanto maior a proporção de domicílios chefiados por mulheres, mais sensível.</p>
		<p><b>Percentual de chefes de família jovens:</b> percentual do total de domicílios chefiados por pessoas entre 10 e 29 anos de idade.</p>	<p>Quanto maior a proporção de domicílios chefiados por jovens, mais sensível/vulnerável.</p>
		<p><b>Percentual da população até 5 anos de idade:</b> grupo social mais vulnerável em situações de desastres e que requer cuidados permanentes.</p>	<p>Quanto maior a proporção de população infantil, mais sensível.</p>
		<p><b>Percentual de população idosa (60 anos ou mais):</b> grupo social mais vulnerável em situações de desastres e que requer cuidados permanentes.</p>	<p>Quanto maior a proporção de população idosa, mais sensível.</p>
		<p><b>Percentual da população com deficiência:</b> percentual do total de população com alguma forma de deficiência (mental, visual, auditiva, motora ou intelectual). Grupos social mais vulnerável em situação de desastres e que pode requerer atenção especializada.</p>	<p>Quanto maior o percentual de população deficiente, maior a sensibilidade.</p>

		<b>População ribeirinha:</b> grupo social muito dependente dos recursos naturais para sobrevivência.	Quanto maior o percentual de população ribeirinha, mais sensível/vulnerável.
		<b>Projeção de crianças entre 0 e 4 anos para 2040:</b> proporção de população infantil em 2040.	Quanto maior a população infantil esperada para 2040, mais sensível.
		<b>Projeção de idosos com 60 anos ou mais para 2040:</b> proporção de população idosa em 2040.	Quanto maior a população idosa esperada para 2040, mais sensível.
<b>ÍNDICE DE CAPACIDADE ADAPTATIVA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Índice de Estruturas Socioeconômicas (IES);</b> esse indicador foi baseado no Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal (IFDM), calculado para todos os municípios brasileiros. O IFDM varia entre 0 e 1, em que 0 representa o menos desenvolvido e 1 o município mais desenvolvido. Esse raciocínio é oposto ao aplicado à lógica da vulnerabilidade. Assim, para a construção do Índice de Estruturas Socioeconômicas (IES) foi utilizado o inverso do IFDM para que a atribuição de notas seguisse o raciocínio da vulnerabilidade – 0 o menos vulnerável e 1 o mais vulnerável.</li> </ul>	Reflete o capital social da comunidade e englobe os seguintes aspectos 1) estruturas de geração de emprego e renda; 2) Estrutura e qualidade da educação; e 3) Estrutura da saúde.	Quanto maior o valor do IES, mais vulnerável/ menos adaptado.
		<b>Existência de instituições de segurança:</b> defesa civil municipal, corpo de bombeiros e guarda municipal. Reflete a capacidade estrutural do município de lidar com os impactos do clima	Quanto maior o número de instituições de segurança, menos vulnerável.
	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Índice de Instituições, Serviços e Infraestrutura para Adaptação (IADAp)</b> <i>IADAp = (Nota instituições de segurança + Nota instrumentos de gestão de risco + Nota serviços de saúde) / 3</i></li> </ul>	<b>Existência de instrumentos de gestão de risco para deslizamentos e inundações:</b> mapeamento das áreas de risco, programa habitacional, controle de áreas de risco, planos de contingência, projetos de engenharia, sistemas de alerta e avaliação de risco. Indicativo da capacidade do município de lidar e mitigar os impactos do clima.	Quanto maior o número de instrumentos de gestão, menos vulnerável.
		<b>Serviços de saúde:</b> indicam a capacidade do município de prover serviços básicos à população. As informações	Quanto maior o número de leitos e a cobertura da atenção básica, menor vulnerável/ mais

		utilizadas foram 1) número de leitos por 1000 habitantes e 2) cobertura da atenção básica.	adaptado.
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Índice de Organização Sociopolítica (IOS)</li> </ul>	<p><b>Existência de conselhos e consórcios municipais relacionados à adaptação ao clima:</b> proxy do capital social da comunidade. Os conselhos e consórcios avaliados foram meio ambiente, bem-estar social, saneamento básico, trabalho e emprego, habitação, transporte, desenvolvimento urbano e direitos humanos.</p>	Quanto maior o número de conselhos e consórcios, menos vulnerável.
ÍNDICE DE CENÁRIO CLIMÁTICO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Índice de Temperatura = <math>(TMAX_{mean} + TMIN_{mean}) / 2</math></li> <li>• Índice de Precipitação = <math>(Rx5day + R95p + CDD + PRCP_{TOT}) / 4</math></li> </ul>	<p><b>Anomalias de temperatura:</b> média anual da temperatura máxima (TMAXmean) e média anual da temperatura mínima (TMINmean).</p>	Quanto maior a anomalia, mais vulnerável.
		<p><b>Anomalias de precipitação:</b> Rx5day (precipitação máxima em 5 dias consecutivos); R95p (precipitação total anual nos dias em que a quantidade diária excedeu o percentil 95); CDD (número máximo de dias consecutivos em que a precipitação diária foi menor que 1mm); PRCPTOT (precipitação total anual dos dias úmidos).</p>	Quanto maior a anomalia, mais vulnerável.

No âmbito do presente estudo, o percentual de cobertura vegetal nativa, o desmatamento acumulado e a ocorrência/susceptibilidade dos municípios a extremos climáticos serão considerados como componentes do SSE capazes de aumentar a vulnerabilidade das populações. Nesse sentido, quanto menor a cobertura vegetal, maior a exposição apresentada pelo município aos impactos da mudança do clima; por outro lado, quanto maior o desmatamento acumulado e a ocorrência/susceptibilidade do município a extremos climáticos, maior sua exposição. Esses aspectos são esclarecidos em mais detalhes nos tópicos seguintes que constituirão o Índice de Exposição.

#### **5.8.1.1 Indicador de cobertura vegetal e desmatamento (ICVD)**

Para este indicador, serão usados a cobertura vegetal nativa e o desmatamento acumulado para os municípios do Amazonas. O pressuposto para utilização dos dados é que ecossistemas mais conservados são capazes de minimizar os impactos da mudança climática sobre os territórios e populações, tornando-os menos expostos.

Tanto a cobertura vegetal quanto o desmatamento acumulado foram obtidos do PRODES, vinculado ao INPE, a partir dos dados de floresta em km<sup>2</sup> para o ano de 2014 e para os anos de 2000 a 2013, respectivamente. Para ambos, a informação foi utilizada como percentual, da seguinte forma: a proporção da área de floresta nativa em relação à área do município em 2014 e a proporção da área de floresta desmatada entre 2000 e 2013 em relação à área de floresta existente no início da série histórica. Ambos funcionam como um proxy dos serviços ecossistêmicos, porém, o desmatamento acumulado serve também para dimensionar, indiretamente, a pressão antrópica exercida sobre o sistema natural, pois adiciona uma dimensão temporal à variável estática “área de cobertura vegetal”.

Os valores obtidos foram divididos em grupos através de percentis, de forma que fossem atribuídas notas variando entre 0 e 4. As notas indicaram uma gradação de exposição – quanto maior a nota, mais exposto é o município no aspecto avaliado. Para o desmatamento acumulado, foram utilizados os percentis P5, P25, P75, P95. O agrupamento dos valores percentuais do desmatamento acumulado a partir dos percentis é mostrado na tabela 1, em que quanto maior o percentual desmatado, maior a nota atribuída ao município. Para a cobertura vegetal nativa, o município de Urucurituba apresentou um valor muito discrepante dos demais, tendo sido o mais baixo do estado proporcionalmente. Dessa forma, esse município foi considerado como o mais vulnerável nesse aspecto e, por isso, foi o único que recebeu a

nota 4. Os demais municípios receberam notas de 0 a 3 de acordo com os percentis – P5, P50, P95. A distribuição dos percentuais de cobertura vegetal e as respectivas notas podem ser observadas na tabela 1 com a seguinte interpretação: quanto maior a proporção de cobertura vegetal do município, menor a exposição e menor a nota.

**Tabela 1.** Notas e distribuição dos percentuais de desmatamento acumulado e cobertura vegetal nativa para os municípios do Amazonas

Nota	Desmatamento acumulado entre 2000-2013 (%)	Cobertura vegetal nativa em 2014 (%)
0	< 0,06	≥ 95,25
1	0,06  -- 0,2	95,25 --  77,13
2	0,2  -- 2,0	77,13 --  36,10
3	2  -- 6,16	36,10 --  4,27
4	≥ 6,16	≤ 4,27

As notas atribuídas a cada município nos quesitos mencionados anteriormente foram utilizadas para calcular o Índice de Cobertura Vegetal e Desmatamento (ICVD). Inicialmente, foi feita uma média aritmética das notas recebidas (Equação 1.2) e uma padronização do valor obtido de forma que o ICVD apresentasse uma escala entre 0 e 1. Assim, 0 foi o valor atribuído ao município com menor exposição e 1 ao município com maior exposição, sendo os demais valores indicativos da distância relativa entre o caso menos exposto e o mais exposto.

(Equação 1.2)

$$ICVD = \frac{(Nota\ cobertura\ vegetal\ nativa + Nota\ desmatamento\ acumulado)}{2}$$

### 5.8.1.2 Índice de desastres naturais (IDN)

Para a construção do índice, foram usados sub-índices para mensurar: 1) a susceptibilidade do município aos desastres e 2) a frequência com que ocorreram eventos extremos e vítimas fatais.

O primeiro subíndice, nomeado como Índice de Susceptibilidade a Desastres Naturais (ISDN), considerou dois aspectos: a população vivendo em áreas de risco e a propensão a períodos de estiagem na série histórica. Para a população em risco foram utilizados os registros da Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais (CPRM). O CPRM é responsável pela setorização dos riscos geológicos em municípios de alto e muito alto risco à ocorrência



de desastres, principalmente os relacionados a movimentos de massa e a eventos hidrológicos. A Companhia realiza o levantamento do número de moradias existentes nos setores municipais considerados de risco, através de imagens de satélite de alta resolução, estimando também o número de pessoas e famílias em cada setor. Como forma de mensurar o quantitativo aproximado de pessoas vivendo em áreas de risco e, portanto, mais susceptíveis aos desastres naturais, a estimativa feita pelo CPRM foi utilizada para compor o ISDN. Dessa forma, a população considerada em risco foi relativizada para a população total residente. Os valores obtidos foram agrupados de acordo com os percentis P5, P25, P75 e P95 para receberem notas entre 0 e 4, conforme a tabela 2, de forma que quanto maior o percentual de pessoas em risco no município, maior a nota recebida.

Ainda no ISDN, foi utilizado o parâmetro climático CDD médio como forma de melhor mensurar a susceptibilidade à estiagem-seca para o Amazonas. Neste são contabilizados o número máximo de dias consecutivos em que a precipitação diária foi menor que 1mm, por município. Para o cálculo do CDD médio, foram utilizadas séries históricas de no mínimo 20 anos de pluviosidade das estações meteorológicas disponíveis na plataforma Hidroweb, da Agência Nacional de Águas, existentes para o Amazonas. Os dados sobre o CDD médio foram então agrupados a partir da divisão dos percentis P5, P25, P75 e P95 para receberem notas entre 0 e 4, de maneira que, quanto maior o número médio de dias consecutivos secos observados na série histórica, maior a nota (Tabela 2).

**Tabela 2.** Notas e distribuição do percentual de pessoas em risco por município e do número médio de dias consecutivos sem chuva na série histórica para o estado do Amazonas.

Nota	População em risco segundo CPRM (%)	Dias consecutivos secos (médio)
0	< 0,20	< 11,50
1	0,20  -- 0,95	11,50  -- 14,80
2	0,95  -- 5,98	14,80  -- 21,30
3	5,98  -- 25,76	21,30  -- 35,10
4	≥ 25,76	≥ 35,10

Para o cálculo do ISDN foi então realizada a média aritmética das notas atribuídas à população em risco pelo CPRM e ao CDD médio por município, com posterior padronização, de acordo com a equação 1.3.

(Equação 1.3)

$$ISDN = \frac{(Nota\ população\ em\ risco + Nota\ CDD\ médio)}{2}$$

Para a construção do sub-índice de ocorrência de desastres naturais (IODN), foram utilizadas as seguintes informações:

- 1) Eventos extremos por município: informações quanto a inundação/alagamento/enxurrada, estiagem/seca, movimentos de massa, incêndios florestais e erosão fluvial retiradas do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (1991-2012).
- 2) Vítimas fatais por município: informações sobre óbitos foram fornecidas pela Defesa Civil Nacional e compreenderam o período de 2006 a 2012.

Para o cálculo do IODN, foi considerada a proporção (%) de eventos extremos em cada município com relação ao total de eventos no estado e a proporção (%) de óbitos ocorridos no município em relação ao total de eventos no próprio município medindo, assim, a gravidade dos eventos ocorridos. Os valores observados tanto para a proporção de eventos quanto para a proporção de óbitos receberam notas variando de 0 a 4, que foram atribuídas de acordo com percentis P5, P25, P75 e P95 (Tabela 3). Em seguida, foi calculada a média aritmética das notas dadas à proporção de eventos e de vítimas fatais para cada município, conforme a equação 1.4, seguido de padronização.

**Tabela 3.** Notas e distribuição da proporção de eventos no município e da proporção de óbitos no município para o estado do Amazonas.

Nota	Eventos no município em relação aos eventos no estado (%)	Óbitos no município em relação aos eventos no município (%)
0	< 1,43	< 5,88
1	1,43  -- 1,63	5,88  -- 11,76
2	1,63  -- 2,24	11,76  -- 40,00
3	2,24  -- 3,47	40,00  -- 125,00
4	≥ 3,47	≥ 125,00

(Equação 1.4)

$$IODN = \frac{(Nota\ proporção\ de\ eventos + Nota\ proporção\ de\ vítima\ fatais)}{2}$$

Para a obtenção do índice de desastres naturais final (IDN), foi feita a média aritmética das notas obtidas no ISDN e no IODN padronizados, conforme a equação 1.5. O passo

seguinte foi a padronização do IDN para obter a escala de valores indicativas de vulnerabilidade/exposição entre 0 e 1. Os municípios com valor 0 são os de menor grau de exposição aos desastres naturais e os municípios com valor 1, os de maior exposição.

(Equação 1.5)

$$IDN = \frac{(ISDN_p + IODN_p)}{2}$$

### 5.8.1.3 Cálculo do índice de exposição final (IE)

O Índice de Exposição final (IE) foi a média aritmética dos índices calculados anteriormente, o ICVD e o IDN padronizados, ambos compreendidos no componente de exposição do modelo conceitual desse trabalho (Equação 1.6). A padronização do IE gerou um índice variando entre 0 e 1, indicando os municípios que apresentaram menor exposição à alteração climática (valor 0) e os municípios com maior exposição ao clima (valor 1) e, portanto, mais vulneráveis.

(Equação 1.6)

$$IE = \frac{(ICVD_p + IDN_p)}{2}$$

### 5.8.2 Índice de sensibilidade (IS)

A sensibilidade pode ser definida como o grau com que um sistema pode ser afetado, de maneira adversa ou benéfica, pela variabilidade do clima (IPCC, 2014b). Esse componente diz respeito às susceptibilidades intrínsecas do SSE no presente; como por exemplo, as condições de moradia e de acesso a bens e serviços ou a carga de uma doença com incidência modulada pelo clima que recai sobre determinada população.

Isso posto, o presente trabalho considerou as doenças sensíveis ao clima, a pobreza e as características sociodemográficas da população amazonense, como os componentes intrínsecos do SSE que modulam sua sensibilidade ao clima no momento presente. Dessa forma, quanto menor a carga de doença apresentada por um município, menor sua sensibilidade, assim como quanto melhor as condições de pobreza e sociodemográficas da

população, menor a sensibilidade do município. Esses índices e suas interpretações são esclarecidos nos tópicos que se seguem.

#### 5.8.2.1 Índice de doenças associadas ao clima (IDAC)

Para a construção do índice, foram escolhidas as doenças sensíveis ao clima mais importantes para o estado do Amazonas – dengue, leishmaniose tegumentar e malária. A essas doenças foram acrescentados os casos de acidentes por animais peçonhentos.

Os dados municipais foram obtidos através do Sistema de Informação de Agravos de Notificação (SINAN) e do Sistema de Informação de Vigilância Epidemiológica da Malária (SIVEP-MALARIA). Para o SINAN, os filtros utilizados foram: município de residência e ano do primeiro sintoma/ ano de diagnóstico. Para o SIVEP, foram utilizados os relatórios anuais por provável local de infecção. As séries históricas compreenderam os seguintes períodos: 2001 a 2012 para dengue e acidentes por animais peçonhentos, 2001 a 2013 para leishmaniose tegumentar e 2004 a 2014 para malária. Os indicadores que compuseram o índice foram:

- a) A proporção de casos;
  - A proporção se baseou nos casos ocorridos no município durante a série histórica em relação ao total de casos ocorridos no estado durante o mesmo período.
- b) A incidência média;
  - A incidência média foi calculada a partir do número absoluto de casos em relação à população do município, por 100 mil habitantes, por ano. Para malária, foi utilizada a incidência por 1000 habitantes, representando o índice parasitário anual. As incidências anuais foram usadas para calcular a incidência média para a série histórica por município.
- c) A tendência dos casos de cada doença.
  - A tendência foi baseada na incidência anual para analisar o comportamento da doença, se crescente, decrescente ou neutro. Para tanto, foi ajustado um modelo de regressão local não paramétrico conhecido como LOES (“*locally weighted scatter plot smooth*”), originalmente proposto por CLEVELAND (1979) e desenvolvido por CLEVELAND; DEVLIN (1988). Esse método estima curvas através de suavização, permitindo que as diferenças observadas na tendência entre os anos da série histórica sejam minimizadas sem que as informações de anos anteriores sejam descartadas.

Os percentis utilizados para atribuir notas de 0 a 4 às informações de proporção, incidência e tendência, assim como seus respectivos intervalos, são mostrados na tabela 4. Quanto maior a proporção e a incidência, maior a nota. Para tendência, os valores negativos foram considerados um indicativo de menor sensibilidade, enquanto os valores positivos foram considerados como de maior sensibilidade.

Tabela 4. Percentis utilizados para atribuir as notas, com seus respectivos intervalos, para as doenças sensíveis ao clima

Doença	Indicadores	Percentil	Nota				
			0	1	2	3	4
Acidentes por Animais Peçonhentos	Incidência	P2,5;P25;P75;P97,5	<34,3	34,3 -- 58,53	58,53 -- 108,80	108,80 -- 209,74	≥209,74
	Proporção	P2,5;P25;P75;P97,5	<0,28	0,28 -- 0,68	0,68 -- 1,89	1,89 -- 5,15	≥5,15
	Tendência	P2,5;P25;P75;P97,5	<-31,53	-31,53 -- -11,82	-11,82 -- 16,75	16,75 -- 59,70	≥59,70
Malária	Incidência	P2,5;P25;P75;P97,5	<0,43	0,43  -- 16,99	16,99 -- 101,87	101,87 -- 222,04	≥222,04
	Proporção	P1;P25;P75;P99	<0,01	0,01 -- 0,36	0,36 -- 2,37	2,37 -- 20,86	≥20,86
	Tendência	P2,5;P25;P75;P97,5	<-45,31	-45,31 -- -5,0	-5,0 -- 0,52	0,52 -- 28,64	≥28,64
Dengue	Incidência	P1;P25;P75;P99	<2,12	2,12 -- 13,40	13,40 -- 160,13	160,13 -- 472,40	≥472,40
	Proporção	P1;P25;P75;P99	<0,01	0,01 -- 0,02	0,02 -- 0,50	0,50 -- 84,34	≥84,34
	Tendência	P2,5;P25;P75;P97,5	<-419,69	-419,69 -- -65,46	-65,46 -- 0,70	0,70 -- 302,97	≥302,97
Leishmaniose Tegumentar	Incidência	P2,5;P25;P75;P97,5	<3,41	3,41 -- 12,93	12,93 -- 72,20	72,20 -- 839,55	≥839,55
	Proporção	P2,5;P25;P75;P97,5	<0,03	0,03 -- 0,10	0,10 -- 0,92	0,92 -- 14,75	≥14,75
	Tendência	P2,5;P25;P75;P97,5	<-94,22	-94,22 -- -10,85	-10,85 -- 1,35	1,35 -- 18,97	≥18,97

Para cada doença, foi feita a média aritmética das notas atribuídas aos indicadores proporção, incidência e tendência por município (Equação 1.7). Em seguida, os valores obtidos para cada doença foram padronizados para variar entre 0 e 1.

(Equação 1.7)

$$\text{Índice da Doença}_x = \frac{(\text{Nota proporção} + \text{Nota incidência} + \text{Nota tendência})}{3}$$

A etapa final do cálculo consistiu na média aritmética do valor padronizado de cada doença e sua posterior padronização para gerar o IDAC (Equação 1.8). O IDAC, então, apresentou uma escala variando entre 0 e 1, sendo 0 o valor atribuído ao município de menor sensibilidade e 1 o valor do município com maior sensibilidade.

(Equação 1.8)

$$\text{IDAC} = \frac{(\text{Dengue}_p + \text{Leishmaniose}_p + \text{Malária}_p + \text{Animais Peçohentos}_p)}{4}$$

### 5.8.2.2 Índice de pobreza humana (IPo)

O presente trabalho considerou os aspectos monetários e não monetários da pobreza, pois além de complementares, estes fatores permitem uma análise mais ampla do tema. Na abordagem monetária, foi contabilizada a porcentagem dos domicílios com renda abaixo da linha da pobreza, fixada em meio salário mínimo. Para tanto foram consideradas as seguintes categorias do salário mínimo – até 1/8, mais de 1/8 a 1/4, mais de 1/4 a 1/2 e sem rendimento, extraídas do Censo Demográfico 2010 (IBGE, 2010). Na abordagem não monetária, foram considerados:

- 1) Probabilidade de morrer antes dos 40 anos: para esse indicador foi utilizado o inverso da probabilidade de sobrevivência até os 40 anos de idade, disponível no Atlas do Desenvolvimento Humano do Brasil (PNUD; IPEA; FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2013);
- 2) Porcentagem da população acima de 25 anos analfabeta: razão entre a população de 25 anos ou mais de idade que não sabe ler nem escrever e o total de pessoas nessa faixa etária, multiplicada por 100. Os dados foram extraídos do Atlas do

Desenvolvimento Humano do Brasil (PNUD; IPEA; FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2013);

- 3) Porcentagem de domicílios com saneamento básico inadequado: informação proveniente do Censo Demográfico 2010, que disponibiliza a proporção de domicílios com saneamento adequado, semi-adequado e inadequado (IBGE, 2010). Para o IBGE, o domicílio com saneamento adequado é aquele em que há abastecimento de água por rede geral, esgotamento sanitário por rede geral ou fossa séptica, e lixo coletado direta ou indiretamente; inadequado é aquele em que todas as formas de saneamento não foram observadas;
- 4) Taxa de mortalidade infantil até 5 anos de idade: número de crianças que não deverão sobreviver ao primeiro ano de vida em cada 1.000 nascidos vivos, disponível no Atlas de Desenvolvimento Humano do Brasil (PNUD; IPEA; FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2013).

As informações foram divididas em grupos para receber notas entre 0 e 4, conforme a tabela 5. Todos os indicadores seguiram o intervalo determinado pelos percentis P5, P25, P75, P95, exceto saneamento básico, que foi agrupado segundo os percentis P1, P25, P75, P99. Em seguida, foi calculada a média aritmética das notas apresentadas por cada município, conforme a equação 1.9.

**Tabela 5.** Intervalos dos percentis utilizados para atribuir as notas aos indicadores de renda, probabilidade de morrer antes dos 40 anos, analfabetismo, saneamento e mortalidade infantil.

Indicador	Nota				
	0	1	2	3	4
Domicílios com renda abaixo da linha da pobreza (%)	<51,23	51,23 -- 63,93	63,93 -- 72,92	72,92 -- 80,61	≥80,61
Probabilidade de morrer antes dos 40 anos	<4,08	4,08 -- 4,79	4,79 -- 5,97	5,97 -- 6,94	≥6,94
População acima de 25 anos analfabeta (%)	<10,36	10,36 -- 15,03	15,03 -- 33,33	33,33 -- 43,57	≥43,57
Domicílios com saneamento básico inadequado (%)	≤0,90	0,90  -- 32,20	32,20 -- 47,80	47,80 -- 80,00	≥80,00
Taxa de mortalidade infantil	<18,601	18,60 -- 21,96	21,96 -- 27,72	27,72 -- 32,38	≥32,38

(Equação 1.9)

$$IPG = \frac{(Nota\ prob.\ morrer + Nota\ pop.\ analfabeta + Nota\ saneamento + Nota\ mort.\ infantil + Nota\ renda)}{5}$$



### 5.8.2.3 Índice de sensibilidade sociodemográfica (ISS)

A construção do ISS compreendeu um componente presente e um futuro. As informações do componente presente foram obtidas do Censo Demográfico 2010 (IBGE, 2010), sendo as seguintes:

1. Proporção de chefes de família jovens: os dados compreenderam os responsáveis pela família com idades entre 10 e 29 anos, independentemente do nível de instrução;
2. Mulheres chefes de família sem instrução: os dados se referiram às mulheres que são as responsáveis pela família, nas categorias sem instrução e fundamental incompleto, independentemente da idade;
3. Proporção da população com 60 anos ou mais;
4. Proporção da população com até 5 anos;
5. Proporção da população deficiente: compreendeu os grupos de residentes que apresentavam pelo menos uma das deficiências contempladas no Censo (visual, motora, auditiva e mental/intelectual);
6. Proporção da população ribeirinha: shapefiles da população residente em domicílios particulares permanentes foram sobrepostos à malha municipal, à rede hidrográfica e aos terrenos sujeitos à inundação no Amazonas, através do software ArcGIS, da ESRI, na versão 10.3.

A distribuição dos valores encontrados em cada indicador seguiu os intervalos determinados pelos percentis P5, P25, P75 e P95, conforme tabela 6.

**Tabela 6.** Intervalos dos percentis utilizados para atribuir as notas aos indicadores chefes de família, mulheres chefes de família, população infantil e idosa, população deficiente e população ribeirinha.

Indicador	Nota				
	0	1	2	3	4
Chefes de família jovens (%)	<3,23	3,23 -- 4,07	4,07 -- 5,07	5,07 -- 5,88	≥5,88
Mulheres chefes de família sem instrução (%)	<2,54	2,54 -- 3,65	3,65 -- 4,98	4,98 -- 6,09	≥6,09
População com 60 anos ou mais (%)	<4,36	4,36 -- 5,14	5,14 -- 6,50	6,50 -- 7,32	≥7,32
População até 5 anos (%)	<12,24	12,24 -- 13,89	13,89--16,75	16,75 -- 18,18	≥18,18
População deficiente (%)	<12,34	12,34 -- 16,99	16,99 -- 22,31	22,31 -- 25,73	≥25,73
População ribeirinha (%)	<4,89	4,89 -- 24,44	24,44 -- 45,72	45,72 -- 93,76	≥93,76

Após essa etapa, foi realizada a média aritmética das notas atribuídas a cada indicador, com posterior padronização, gerando o ISS presente (Equação 2.0).

(Equação 2.0)

$$ISS_{\text{presente}} = \frac{(Nota\ chefes\ jovens + Nota\ mulheres\ chefes + Nota\ pop.\ idosa + Nota\ pop.\ infantil + Nota\ pop.\ deficiente + Nota\ pop.\ ribeirinha)}{6}$$

O componente futuro do ISS se baseou na projeção de crescimento populacional de cada município amazonense até o ano 2040. Considerando a maior vulnerabilidade de crianças e pessoas acima de 60 anos, foi utilizado o percentual do contingente populacional projetado para 2040 dessas faixas etárias em relação à população total, projetado para o mesmo ano. A atribuição de notas entre 0 e 4 seguiu os intervalos determinados pelos percentis P5, P25, P50, e P95 (tabela 7). Posteriormente, foi realizada a média aritmética das notas com posterior padronização, gerando o ISS futuro (Equação 2.1).

**Tabela 7.** Intervalos dos percentis utilizados para atribuir as notas aos indicadores de projeção de crianças e de idosos para o ano de 2040.

Indicador	Nota				
	0	1	2	3	4
Projeção da população com 60 anos ou mais	<0,110	0,110 -- 0,124	0,124 -- 0,157	0,157 -- 0,18	≥0,18
Projeção da população com até 5 anos	<0,052	0,052 -- 0,568	0,568 -- 0,63	0,63 -- 0,698	≥0,698

(Equação 2.1)

$$ISS_{\text{futuro}} = \frac{(Nota\ população\ infantil + Nota\ população\ idosa)}{2}$$

O cálculo final do Índice de Sensibilidade Sociodemográfica consistiu na média aritmética dos ISS presente e futuro (Equação 2.2), seguido de padronização. Assim, o ISS apresentou escala de 0 a 1, indicando os municípios menos sensíveis na dimensão sociodemográfica (nota 0) e os mais sensíveis (nota 1).

(Equação 2.2)

$$ISS = \frac{(ISS_{presente} + ISS_{futura})}{2}$$

#### 5.8.2.4 Cálculo do índice de sensibilidade (IS)

O Índice de Sensibilidade final (IS) representou a média aritmética dos índices padronizados calculados acima, compreendidos no componente de sensibilidade do modelo conceitual desse trabalho (Equação 2.3). A padronização do IS gerou um índice variando entre 0 e 1, indicando os municípios que apresentam menor sensibilidade à alteração climática (nota 0) e os municípios com maior sensibilidade ao clima (nota 1).

(Equação 2.3)

$$IS = \frac{(IDAc_p + IPo_p + ISS_p)}{3}$$

#### 5.8.3 Índice de capacidade adaptativa (ICA)

A capacidade adaptativa diz respeito à habilidade dos sistemas, instituições, pessoas e outros organismos de se ajustar a um potencial dano, se aproveitar das oportunidades ou de responder às consequências advindas da mudança do clima (IPCC, 2014b). A capacidade adaptativa representa uma característica externa ao ente impactado, abrangendo aspectos como o papel das instituições, governança, gestão e capital social que permitem às populações alterar seu funcionamento em resposta a um impacto no futuro, no caso, a mudança climática. De modo geral, a capacidade adaptativa modula os demais componentes da vulnerabilidade: ainda que elevadas exposição e sensibilidade representem impactos negativos em um contexto de mudança do clima, a capacidade adaptativa é capaz de reduzir a vulnerabilidade das populações. Dessa forma, a interpretação dos índices associados a essa característica geralmente é feita de forma inversa: quanto maior a capacidade adaptativa, menor a vulnerabilidade. Porém, considerando a facilidade de interpretação, os mapas produzidos no capítulo de capacidade adaptativa mantiveram o raciocínio dado aos demais componentes da vulnerabilidade: os menores valores (0,0) representam os menos vulneráveis – portanto, melhor adaptados; enquanto os maiores valores (1,0) representaram os municípios de maior vulnerabilidade, logo, com menor capacidade de adaptação.

Devido à capacidade adaptativa representar uma resposta a um possível impacto futuro, algo ainda não concretizado, sua caracterização pode ser representada por variáveis de médio e longo prazo (educação, infraestrutura de serviços, capacidade institucional, etc). No presente trabalho, os componentes utilizados para construir o ICA foram a estrutura socioeconômica; as instituições, serviços e infraestrutura para adaptação; e a participação/ organização sócio-política da população de cada município amazonense. Acredita-se que estas informações irão definir a maneira pela qual a sociedade pode lidar com os perigos climáticos adversos a fim de minimizar os possíveis impactos. Foi considerado que, quanto melhores as características do município nesses quesitos, maior a capacidade de se adaptar à mudança do clima e, conseqüentemente, menor a vulnerabilidade.

### 5.8.3.1 Índice de estruturas socioeconômicas (IES)

O IES se baseou no Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal (IFDM), produzido pela Confederação das Indústrias do Rio de Janeiro, para todos os municípios brasileiros, com o intuito de avaliar o desenvolvimento relativo à saúde, educação e emprego/renda. O IFDM apresenta uma variação de 0 a 1 agrupada em quatro categorias (baixo-desenvolvimento de 0 a 0,4; regular - de 0,4 a 0,6; moderado - de 0,6 a 0,8; e alto - 0,8 a 1). Observando as categorias, fica evidente que a interpretação do IFDM é inversa à que foi utilizada no presente trabalho: no IFDM, a maior nota representa o município mais desenvolvido, enquanto no raciocínio da vulnerabilidade, a maior nota é sempre referente ao município mais vulnerável e, portanto, menos adaptado ou desenvolvido. Por isso, no presente trabalho, foi considerado o inverso do IFDM (1-IFDM), que foi nomeado como Índice de Estruturas Socioeconômicas (IES). Os valores obtidos foram agrupados a partir dos percentis P5, P25, P75, P95 para receber notas entre 0 e 4 (tabela 8). Em seguida, foi feita a padronização.

**Tabela 8.** Intervalos dos percentis utilizados para atribuir as notas ao Índice de Estruturas Socioeconômicas (IES).

Indicador	Nota				
	0	1	2	3	4
Estruturas Socioeconômicas	<0,401	0,401 -- 0,502	0,502 -- 0,577	0,577 -- 0,630	≥0,630

### 5.8.3.2 Índice de instituições, infraestruturas e serviços para adaptação (IAdap)

Para este índice, foram usadas informações sobre 1) o gerenciamento de risco de desastres, 2) a existência de instituições de segurança e 3) os serviços de atendimento à saúde.

Para o indicador de Gerenciamento de Risco, foram utilizadas informações qualitativas presentes na Pesquisa de Informações Básicas Municipais – MUNIC (IBGE, 2013), cujo foco são os aspectos relevantes da gestão e da estrutura dos municípios. As informações de gerenciamento de risco foram compiladas, separadamente, para os eventos hidrológicos (enchente/alagamento/enxurrada) e de movimento de massa (escorregamento/deslizamento), ocorridos entre 2009 e 2013. A atribuição de notas partiu das informações sobre: 1) a ocorrência desses eventos e 2) o número de instrumentos de planejamento existentes no município, conforme quadro 2. Os instrumentos de planejamento compreenderam: mapeamento da área de risco, programa habitacional para realocação, controle e fiscalização da ocupação, plano de contingência, projetos de engenharia, sistema de alerta e cadastro de risco. Para o cálculo do indicador, foi realizada a média aritmética das notas municipais atribuídas aos eventos hidrológicos e aos de movimento de massa, com posterior padronização (Equação 2.4).

**Quadro 2.** Método de atribuição das notas às variáveis presentes no item “Gerenciamento de Risco”.

O município foi atingido por desastre?	Quantos instrumentos de planejamento possui?	Nota
<b>Deslizamento / Escorregamento</b>		
Não sabe informar	1 ou mais instrumentos	0
Sem desastre	1 ou mais instrumentos	0
	Nenhum ou não aplicável	0,5
Com desastre	3 ou mais instrumentos	0
	2 instrumentos	0,25
	1 instrumento	0,75
	Nenhum instrumento ou não aplicável	1
<b>Enchentes / Alagamentos / Enxurradas</b>		
Sem desastre	1 ou mais instrumentos	0
	Nenhum ou não aplicável	0,5
Com desastre	3 ou mais instrumentos	0
	2 instrumentos	0,25
	1 instrumento	0,75
	Nenhum instrumento ou não aplicável	1

(Equação 2.4)

$$\text{Indicador Gerenciamento Risco} = \frac{(\text{Nota movimento massa} + \text{Nota evento hidrológico})}{2}$$

Para o indicador de Instituições de Segurança, informações qualitativas foram retiradas da Pesquisa de Informações Básicas Municipais – MUNIC (IBGE, 2014). As instituições de segurança pesquisadas foram corpo de bombeiros, defesa civil e guarda municipal. Foi considerado que a existência dessas instituições torna o município menos vulnerável – para cada instituição que o município não possuía foi atribuída nota 0,33; caso o município possuísse todas as instituições pesquisadas recebia nota 0 (Quadro 3);

**Quadro 3.** Metodologia de atribuição de notas ao item “instituições de segurança”.

Notas	Presença de Corpo de Bombeiros, Defesa Civil Municipal ou Guarda Municipal
0	O município possui todas as instituições pesquisadas
0,33	O município possui duas das instituições pesquisadas
0,66	O município possui apenas uma das instituições pesquisadas
1	O município não possui nenhuma instituição pesquisada

Por fim, para o indicador de Serviços de Atendimento à Saúde foram considerados os leitos por 1000 habitantes (ambulatoriais, urgência, unidade de tratamento intensivo e internação) e a cobertura da Atenção Básica, por município (MINISTÉRIO DA SAÚDE; DATASUS, [s.d.], 2014). Os dados sobre leitos foram agrupados de acordo com os percentis P5, P25, P75 e P95, recebendo notas gradativas entre 0 e 4 (Tabela 9). O raciocínio para atribuição de notas foi, quanto maior o número de leitos, mais adaptado e menos vulnerável; quanto menor o número de leitos, menos adaptado e mais vulnerável. Para o indicador de Cobertura da Atenção Básica, os valores também foram agrupados de acordo com os percentis P5, P25, P75 e P95, porém, devido ao considerável número de municípios com cobertura total, os percentis foram aplicados sem considerar aqueles com 100% de cobertura. Após o agrupamento pelos percentis, os municípios com 100% de cobertura receberam nota 0 juntamente com os municípios com os maiores percentuais de cobertura definidos pelos percentis, conforme tabela 9. Em seguida, foi realizada a média aritmética das notas atribuídas aos indicadores de cobertura e leito, com padronização, para formar o indicador de Serviços de Atendimento à Saúde (Equação 2.5).

**Tabela 9.** Intervalos dos percentis utilizados para atribuir as notas aos indicadores de saúde, leitos e cobertura da atenção básica.

Indicador	Nota				
	4	3	2	1	0
Leitos por 1000 habitantes	<0,74	0,74 -- 1,25	1,25 -- 2,08	2,08 -- 3,76	≥3,76
Cobertura Atenção Básica	<42,74	42,74 -- 54,28	54,28 -- 81,78	81,78 -- 91,81	≥91,81

(Equação 2.5)

$$\text{Indicador Serviços de Saúde} = \frac{(\text{Nota leitos} + \text{Nota atenção básica})}{2}$$

O cálculo final do Índice de Instituições, Serviços e Infraestrutura para Adaptação (IADAp) foi realizado através da média aritmética dos seus 3 componentes em cada município, seguido de padronização (Equação 2.6). O IADAp gerado representou um índice variando entre 0 e 1, indicando os municípios que se apresentam menos adaptados aos impactos do clima (1,0) e os municípios mais adaptados ao clima nos aspectos avaliados (0,0).

(Equação 2.6)

$$\text{IADAp} = \frac{(\text{Indicador gerenciamento} + \text{Indicador segurança} + \text{Indicador serviços saúde})}{3}$$

### 5.8.3.3 Índice de organização sócio-política (IOS)

Para o IOS, foram usadas informações sobre conselhos e consórcios disponíveis na Pesquisa de Informações Básicas Municipais, do ano de 2011 (IBGE, 2011). As informações disponíveis são qualitativas e, dentre as disponíveis, foram selecionadas as seguintes:

1. Conselhos: habitação, saneamento básico e direitos humanos (crianças e adolescente, igualdade racial, idoso, pessoas com deficiência e LGBTT - lésbicas, gays, bissexuais, travestis e transexuais). Estes podem ser consultivos, normativos, fiscalizadores ou deliberativos. Os conselhos de saúde e tutelar não foram incluídos no indicador, pois sua existência é prevista em lei – Lei nº 8.142, de 28 de dezembro de 1990 e Resolução nº 170, de 10 de dezembro de 2014 - (BRASIL, 1990, 2014)e, por isso, não seriam bons discriminadores intermunicipais;

2. Consórcios: meio ambiente, assistência e desenvolvimento social, emprego e trabalho, habitação, transporte, desenvolvimento urbano e saneamento básico. O consórcio pode ser ainda, público, administrativo, em parceria com o setor privado ou com apoio do setor privado ou de comunidades.

A existência de cada uma das categorias de conselho e consórcio supracitada foi contabilizada como 1 e a inexistência como 0. Assim, cada município pôde receber notas variando de 0 a 10, sendo este último correspondente àquele que apresentasse todos os conselhos (3) e consórcios (7) estabelecidos para análise. Os percentis P5, P50, P95 foram usados para dividir os valores obtidos em grupos com notas entre 1 e 4, exceto o município de Tabatinga, que por ter o maior número de conselhos e consórcios do estado, recebeu a nota 0, gerando o IOS (tabela 10). Em seguida, foi feita a padronização das notas, de forma que o IOS padronizado variasse entre 0 – maior número de conselhos e consórcios, menos vulnerável – e 1 – menor número de conselhos e consórcios, menor capacidade adaptativa, mais vulnerável.

**Tabela 10.** Intervalos dos percentis utilizados para atribuir as notas ao indicador de conselhos e consórcios

Indicador	Nota				
	4	3	2	1	0
Número de conselhos e consórcios relacionados à adaptação	<1	1 --2	2 --3	3 --5	≥8

#### 5.8.3.4 Cálculo do índice de capacidade adaptativa (ICA)

O ICA foi calculado a partir da média aritmética de seus três componentes padronizados: IES<sub>p</sub>, IADAp e IOS<sub>p</sub> (Equação 2.7). Em seguida, o próprio ICA foi padronizado para compreender valores escalares entre 0 e 1, os quais representaram os municípios com pior capacidade adaptativa (1) e os com melhor capacidade adaptativa (0).

(Equação 2.7)

$$ICA = \frac{(IES_p + IADAp_p + IOS_p)}{3}$$



#### 5.8.4 Índice de vulnerabilidade (IV)

O Índice Vulnerabilidade (IV) representou a união de todas as informações descritas anteriormente, originando um único índice. Agregou informações do momento presente referentes à conservação ambiental, susceptibilidade e ocorrências de eventos extremos, doenças sensíveis ao clima, pobreza, condições sociodemográficas, características socioeconômicas, de infraestrutura e sócio-políticas. Estas foram agrupadas ao longo deste trabalho em três índices: Índice de Exposição (IE), Índice de Sensibilidade (IS) e Índice de Capacidade Adaptativa (ICA). Desta forma, o IV foi construído como segue (Equação 2.8):

(Equação 2.8)

$$IV = \frac{(IE_p + IS_p + ICA_p)}{3}$$

#### 5.8.5 Índice de cenário climático (ICC)

Um componente climático foi associado aos demais elementos básicos da vulnerabilidade para representar o perigo associado à mudança do clima. De maneira resumida, o hazard é definido pelo IPCC como a ocorrência potencial de um evento relacionado ao clima, seja ele natural ou induzido pelo homem, que pode causar perdas (vidas, saúde, lesões) ou danos (infraestrutura, subsistência, serviços ambientais) (IPCC, 2014b). Assim, o presente trabalho avaliou as possíveis alterações climáticas futuras em relação ao momento atual, projetadas pelo modelo ETA-HadGem-ES, considerando seis dos parâmetros desenvolvidos pelo Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDMI). Os parâmetros foram gerados de acordo com CHANG e cols. (2014) e foram os seguintes: total de chuva anual para dias chuvosos, isto é, dias em que a precipitação é maior ou igual a 1 mm (PRCPTOT); pluviosidade total anual nos dias em que a precipitação é maior que a do 95º percentil dos dias chuvosos (R95p); precipitação mensal máxima consecutiva em 5 dias (Rx5day); o número máximo de dias secos consecutivos para o ano, ou seja, os dias em que as chuvas são inferiores a 1 mm (CDD) e as médias anuais máximas (TMAXmean) e mínimas (TMINmean), em graus Celsius.

A partir de bases espaciais digitalizadas, disponíveis em Sistemas de Informação Geográfica, dados climáticos sobre temperatura e precipitação foram processados para gerar

mapas de anomalias climáticas para todos os municípios do estado do Amazonas. Os dados climáticos foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e correspondem às saídas do modelo climático Eta / HadGem2-ES para temperatura (máxima e mínima - média diária, em Celsius) e precipitação (Rx5day, CDD, R95p e PRCPTOT). O Eta/HadGem2-ES corresponde ao modelo regionalizado (Eta) aninhado ao modelo global HadGem-ES e apresenta uma grade horizontal de 20km em toda a América do Sul. O modelo regionalizado ETA apresenta forte concordância com os dados observacionais de precipitação para a América do Sul e pode ser utilizado para estudos de mudanças climáticas no território brasileiro (CHOU et al., 2014).

As variáveis climáticas foram representadas pelas anomalias climáticas - diferença absoluta entre o período climático futuro (2041-2070) e o período presente (1961-1990). Os RCPs adotados foram os do IPCC AR5, sendo os RCP8.5 - forçante radiativa além de 8,5  $W/m^2$  e concentrações de  $CO_2$  de 1.370 ppm - e RCP4.5, que considera um cenário de forçante radiativa de até 4,5  $W/m^2$  e concentração de  $CO_2$  de 650 ppm, ambos até o ano 2100. Para a análise espacial das variáveis climáticas, a modelagem geoestatística foi realizada com a ferramenta Geostatistical Analyst do software ArcGIS Desktop versão 10.2.2 e Surfer, versão 11 (LUIGGI, 2014). Os dados foram então interpolados para estimar o valor das variáveis climáticas para os locais não disponíveis na base de dados.

Assim, o ICC correspondeu, às anomalias climáticas observadas para cada indicador de extremo climático, tanto no cenário 4.5 quanto no cenário 8.5. Para o cálculo dos cenários de clima 4.5 e 8.5, foram utilizadas as anomalias médias de precipitação e de temperatura, aqui designadas, respectivamente, como IPrec e ITemp. O IPrec representou o aumento ou diminuição da precipitação em  $mm^{-3}$  e o ITemp o aumento ou diminuição da temperatura, em graus Celsius. Os valores médios das anomalias foram agrupados em percentis (P5, P25, P75, P95) e receberam notas entre 0 e 4, conforme tabela 11, indicando uma gradação de municípios menos vulneráveis (0) e mais vulneráveis à mudança do clima futuro (4). Para a atribuição das notas, as variáveis PRCPTOT, Tmax e Tmin foram utilizadas em módulo, com o intuito de diminuir a subjetividade; as variáveis R95p, Rx5day e CDD foram utilizadas em seus valores absolutos, pois partiu-se do pressuposto de que essas variáveis representavam indicadores de condições de precipitação extrema associada à maior chance de desastre.

**Tabela 11.** Intervalos dos percentis utilizados para atribuir as notas aos indicadores de temperatura e precipitação

Índice	Indicador	Nota				
		0	1	2	3	4
<b>Índice de Cenário Climático 4.5</b>						
ITemp	Temperatura mínima	<2,086	2,086 -- 2,256	2,256 -- 2,468	2,468 -- 2,626	≥2,626
	Temperatura máxima	<2,312	2,312 -- 2,720	2,720 -- 3,304	3,304 -- 3,697	≥3,697
	CDD	<-1,319	-1,319 -- 7,594	7,594 -- 26,138	26,138 -- 35,819	≥35,819
IPrec	Rx5day	<-11,141	-11,141 -- -7,013	-7,013 -- 5,379	5,379 -- 11,457	≥11,457
	R95p	<-23,151	-23,151 -- -8,419	-8,419 -- 21,187	21,187 -- 48,339	≥48,339
	Preptot	<0,929	0,929 -- 6,059	6,059 -- 13,418	13,418 -- 23,831	≥23,831
<b>Índice de Cenário Climático 8.5</b>						
ITemp	Temperatura mínima	<3,112	3,112 -- 3,289	3,289 -- 3,754	3,754 -- 3,805	≥3,805
	Temperatura máxima	<3,515	3,515 -- 3,929	3,929 -- 4,775	4,775 -- 5,038	≥5,038
	CDD	<-7,928	-7,928 -- -2,318	-2,318 -- 21,081	21,081 -- 31,191	≥31,191
IPrec	Rx5day	<-8,504	-8,504 -- -0,593	-0,593 -- 7,836	7,836 -- 11,927	≥11,927
	R95p	<-10,919	-10,919 -- -3,176	-3,176 -- 5,047	5,047 -- 12,108	≥12,108
	Preptot	<1,316	1,316 -- 4,138	4,138 -- 13,503	13,503 -- 22,678	≥22,678

O passo seguinte foi realização da média aritmética das notas atribuídas aos componentes do ITemp e do IPrec, para ambos os cenários 4.5 e 8.5, de acordo com as equações 2.9 e 3.0.

(Equação 2.9)

$$IPrec_{4.5 \text{ ou } 8.5} = \frac{(Nota_{PRCPTOT} + Nota_{R95p} + Nota_{RX5day} + Nota_{CDD})}{4}$$

(Equação 3.0)

$$ITemp_{4.5 \text{ ou } 8.5} = \frac{(Nota_{temp.máxima} + Nota_{temp.mínima})}{2}$$

Por fim, foi realizada a média aritmética dos índices de temperatura e precipitação para construção do ICC 4.5 e 8.5, com sua padronização (Equações 3.1)

(Equação 3.1)

$$ICC\ 4.5\ ou\ 8.5 = \frac{(ITemp_p + IPrec_p)}{2}$$

### 5.8.6 Índice municipal de vulnerabilidade (IMV)

O Índice Municipal de Vulnerabilidade (IMV) foi elaborado a partir do Índice de Vulnerabilidade (IV) e dos Índices de Cenário Climático (ICC 4.5 e ICC 8.5). As informações compiladas para o presente estudos foram agrupadas, como evidenciado nos passos metodológicos anteriores, nos componentes fundamentais da vulnerabilidade, a saber, exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. Esses componentes, através de seus índices padronizados, formaram o IV. Este foi combinado aos ICC 4.5 e ICC 8.5, separadamente, gerando um IMV distinto a depender do cenário considerado (Equações 3.2 e 3.3).

(Equação 3.2)

$$IMV_{4.5} = \frac{(IV_p + ICC4.5_p)}{2}$$

(Equação 3.3)

$$IMV_{8.5} = \frac{(IV_p + ICC8.5_p)}{2}$$

O passo final consistiu na padronização do IMV de cada cenário, para que este configurasse um índice escalar entre 0 e 1.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 OS TRÊS COMPONENTES FUNDAMENTAIS DA VULNERABILIDADE

A vulnerabilidade atual dos municípios amazonenses foi mensurada pelo Índice de Vulnerabilidade (IV), que abarca aspectos diversos da população através de três componentes fundamentais, a exposição, a sensibilidade e a capacidade adaptativa. O desempenho dos municípios em cada um desses componentes auxilia na compreensão dos aspectos que mais influenciaram a vulnerabilidade da população e que podem torná-la mais susceptível à mudança do clima no futuro. Assim, os Índices de Exposição, Sensibilidade e Capacidade Adaptativa serão primeiro apresentados para embasar o entendimento dos principais pontos que contribuíram para construir o perfil de vulnerabilidade atual dos municípios do Amazonas.

#### 6.1.2 O Índice de exposição

Seguindo o diagrama apresentado na Figura 10, o primeiro índice fundamental da vulnerabilidade foi o Índice de Exposição, cujo objetivo foi identificar as pessoas ou sistemas mais expostos ao risco climático. Nele, foram avaliados tanto o aspecto ambiental – representado pelo Índice de Cobertura Vegetal e Desmatamento (ICVD); quanto o tema dos desastres – representado pelo Índice de Desastres Naturais (IDN), quer através da Susceptibilidade (ISDN), quer da Ocorrência (IODN). Os valores finais de cada um desses índices, por município e microrregião, podem ser conferidos nas tabelas 12 e 13, respectivamente.

**Tabela 12.** Valores municipais dos índices de susceptibilidade a desastres naturais (ISDN), de ocorrência de desastres naturais (IODN), de desastres naturais (IDN), indicador de desmatamento (IDesm), indicador de cobertura vegetal (ICob), índice de cobertura vegetal e desmatamento (ICVD) e índice de exposição (IE).

Município	INDICADOR/ÍNDICE						
	ISDN	IODN	IDN	IDesm	ICob	ICVD	IE
Alvarães	0,333	0,000	0,200	0,500	0,250	0,286	0,256
Amaturá	0,333	0,000	0,200	0,500	0,500	0,429	0,331
Anamã	0,833	0,333	0,699	0,500	0,250	0,286	0,518
Anori	0,667	0,000	0,400	0,500	0,250	0,286	0,361
Apuí	0,833	0,000	0,500	0,750	0,250	0,429	0,489

Município	INDICADOR/ÍNDICE						
	ISDN	IODN	IDN	IDesm	ICob	ICVD	IE
Atalaia do Norte	0,500	0,667	0,700	0,250	0,500	0,286	0,519
Autazes	0,167	0,667	0,500	0,750	0,500	0,571	0,564
Barcelos	0,500	0,000	0,300	0,250	0,250	0,143	0,233
Barreirinha	0,667	0,500	0,700	0,750	0,500	0,571	0,669
Benjamin Constant	0,667	1,000	1,000	0,250	0,500	0,286	0,677
Beruri	0,500	0,000	0,300	0,500	0,500	0,429	0,384
Boa Vista do Ramos	0,333	0,000	0,200	0,750	0,500	0,571	0,406
Boca do Acre	1,000	0,500	0,900	0,750	0,250	0,429	0,699
Borba	0,667	0,667	0,800	0,250	0,250	0,143	0,496
Caapiranga	0,833	0,333	0,699	0,500	0,250	0,286	0,518
Canutama	1,000	0,167	0,700	0,750	0,250	0,429	0,594
Carauari	0,500	0,167	0,400	0,250	0,000	0,000	0,211
Careiro	0,333	0,833	0,699	0,750	0,500	0,571	0,668
Careiro da Várzea	0,667	0,833	0,900	1,000	0,750	0,857	0,925
Coari	0,500	0,000	0,300	0,250	0,250	0,143	0,233
Codajás	0,500	0,167	0,400	0,250	0,250	0,143	0,286
Eirunepé	0,333	0,333	0,400	0,500	0,000	0,143	0,286
Envira	0,667	0,000	0,400	0,750	0,250	0,429	0,436
Fonte Boa	0,000	0,000	0,000	0,500	0,500	0,429	0,226
Guajará	0,500	0,500	0,600	0,750	0,250	0,429	0,542
Humaitá	0,500	0,667	0,700	0,500	0,500	0,429	0,594
Ipixuna	0,500	0,000	0,300	0,500	0,000	0,143	0,233
Iranduba	0,500	0,667	0,700	1,000	0,500	0,714	0,744
Itacoatiara	0,333	0,333	0,400	1,000	0,500	0,714	0,586
Itamarati	0,667	0,167	0,500	0,250	0,250	0,143	0,338
Itapiranga	0,500	0,000	0,300	0,500	0,750	0,571	0,458
Japurá	0,167	0,167	0,200	0,000	0,500	0,143	0,181
Juruá	0,333	0,000	0,200	0,500	0,250	0,286	0,256
Jutaí	0,000	0,167	0,100	0,250	0,250	0,143	0,128
Lábrea	0,833	0,667	0,900	0,750	0,250	0,429	0,699
Manacapuru	0,500	1,000	0,900	0,750	0,500	0,571	0,774
Manaquiri	0,500	0,500	0,600	0,500	0,500	0,429	0,542
Manaus	0,500	0,667	0,700	0,500	0,500	0,429	0,594
Manicoré	0,500	0,333	0,500	0,500	0,500	0,429	0,489
Maraã	0,500	0,500	0,600	0,500	0,500	0,429	0,542
Maués	0,333	0,000	0,200	0,500	0,250	0,286	0,256
Nhamundá	0,833	0,500	0,800	0,500	0,500	0,429	0,647
Nova Olinda do Norte	0,333	0,500	0,500	0,500	0,500	0,429	0,489
Novo Airão	0,167	0,000	0,100	0,250	0,250	0,143	0,128
Novo Aripuanã	0,833	0,333	0,699	0,500	0,250	0,286	0,518
Parintins	0,667	0,500	0,700	0,750	0,750	0,714	0,744
Pauini	0,833	0,333	0,699	0,500	0,000	0,143	0,443
Presidente Figueiredo	0,667	0,000	0,400	0,500	0,500	0,429	0,436
Rio Preto da Eva	0,667	0,167	0,500	0,500	0,500	0,429	0,489

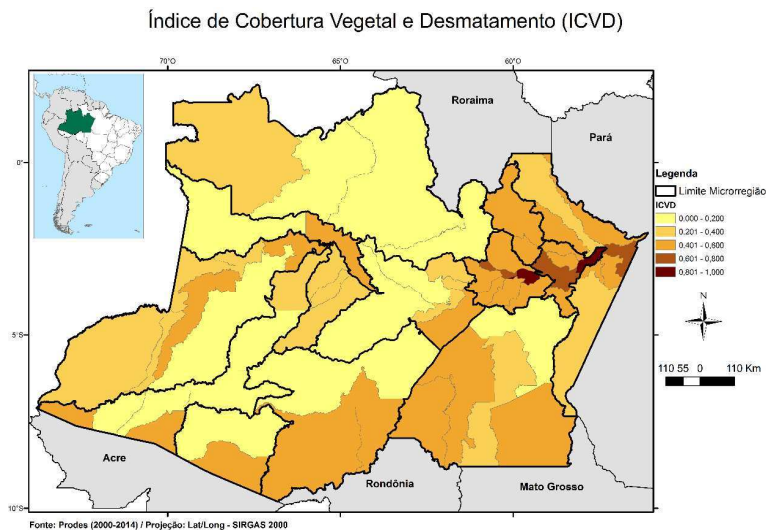
Município	INDICADOR/ÍNDICE						
	ISDN	IODN	IDN	IDesm	ICob	ICVD	IE
Santa Isabel do Rio Negro	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250	0,000	0,000
Santo Antônio do Içá	0,167	0,333	0,300	0,500	0,250	0,286	0,308
São Gabriel da Cachoeira	0,167	0,000	0,100	0,250	0,500	0,286	0,203
São Paulo de Olivença	0,333	1,000	0,800	0,500	0,500	0,429	0,647
São Sebastião do Uatumã	0,333	0,000	0,200	0,500	0,500	0,429	0,331
Silves	0,500	0,000	0,300	0,500	0,500	0,429	0,384
Tabatinga	0,167	0,500	0,400	0,500	0,250	0,286	0,361
Tapauá	0,500	0,000	0,300	0,250	0,250	0,143	0,233
Tefé	0,500	0,333	0,500	0,500	0,250	0,286	0,414
Tonantins	0,167	0,333	0,300	0,500	0,250	0,286	0,308
Uarini	0,000	0,833	0,500	0,500	0,250	0,286	0,414
Urucará	0,333	0,000	0,200	0,250	0,500	0,286	0,256
Urucurituba	0,833	0,667	0,900	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>Valores médios</b>	<b>0,484</b>	<b>0,320</b>	<b>0,482</b>	<b>0,512</b>	<b>0,379</b>	<b>0,367</b>	<b>0,447</b>

**Tabela 13.** Valores, por microrregião, dos índices de susceptibilidade a desastres naturais (ISDN), de ocorrência de desastres naturais (IODN), de desastres naturais (IDN), do indicador de desmatamento (IDesm), indicador de cobertura vegetal (ICob), índice de cobertura vegetal (ICV) e índice de exposição (IE).

Microrregião	INDICADOR/ÍNDICE						
	ISDN	IODN	IDN	IDesm	ICob	ICVD	IE
Alto Solimões	0,259	0,444	0,422	0,417	0,389	0,318	0,389
Boca do Acre	0,917	0,417	0,800	0,625	0,125	0,286	0,571
Coari	0,639	0,139	0,466	0,417	0,292	0,262	0,383
Itacoatiara	0,500	0,300	0,480	0,700	0,650	0,629	0,583
Japurá	0,334	0,334	0,400	0,250	0,500	0,286	0,362
Juruá	0,500	0,167	0,400	0,500	0,143	0,225	0,329
Madeira	0,667	0,400	0,640	0,500	0,350	0,343	0,517
Manaus	0,452	0,738	0,714	0,750	0,536	0,592	0,687
Parintins	0,500	0,214	0,429	0,571	0,500	0,469	0,473
Purus	0,778	0,278	0,633	0,583	0,250	0,334	0,509
Rio Negro	0,209	0,000	0,125	0,188	0,313	0,143	0,141
Rio Preto da Eva	0,667	0,084	0,450	0,500	0,500	0,429	0,463
Tefé	0,278	0,389	0,400	0,500	0,250	0,286	0,361

O ICVD está representado espacialmente no mapa 1. Percebe-se que, de maneira geral, o estado do Amazonas apresentou exposição reduzida no aspecto ambiental. Praticamente toda a região Central e a Norte exibiram valores reduzidos no ICVD, indicando que esses locais apresentam uma combinação de elevada cobertura vegetal com baixo desmatamento. Por outro lado, as microrregiões de Manaus, Itacoatiara e Rio Preto da Eva (região Nordeste) foram as mais expostas, assim como os municípios de Urucurituba e Careiro da Várzea. Vale

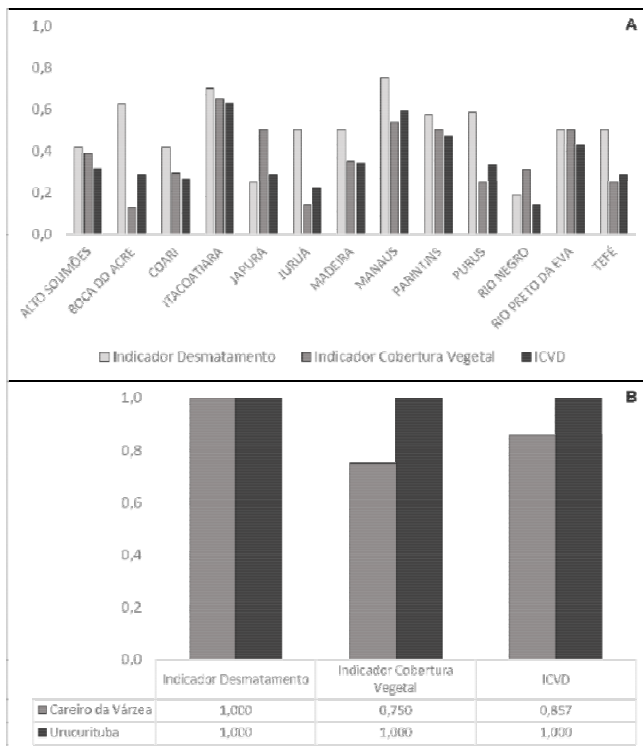
mencionar também as microrregiões do Madeira e Purus, que embora não tenham apresentado valores elevados no ICVD, apresentaram vários municípios com exposição média (a partir de 0,401).



**Mapa 1.** Distribuição dos valores municipais do Índice de Cobertura Vegetal e Desmatamento (ICVD) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação de exposição relacionada ao ICVD – do bege, menos exposto, até o vermelho, mais exposto.

Os valores médios dos indicadores de desmatamento, cobertura vegetal e o ICVD para essas microrregiões são mostrados no gráfico 1A, enquanto os valores absolutos dos municípios mais expostos são mostrados na figura 1B. No que se refere às microrregiões, nota-se que o desmatamento foi o fator que mais influenciou o ICVD, exceto para as microrregiões de Boca do Acre, Japurá e Rio Negro. Nessas, a baixa proporção de cobertura vegetal em relação a área do município foi mais importante. Para os municípios mais expostos, o desmatamento também foi preponderante para elevar o ICVD.

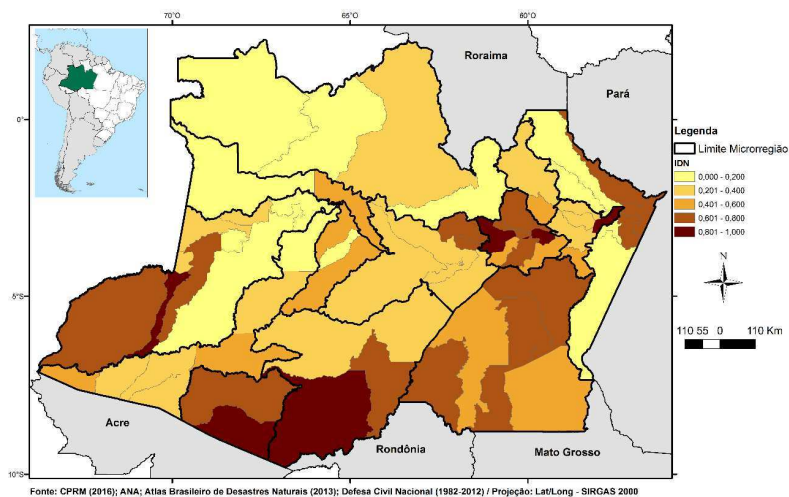




**Gráfico 1.** Valores médios do Índice de Cobertura Vegetal e Desmatamento (ICVD) e de seus componentes, desmatamento e cobertura vegetal, para as microrregiões do estado do Amazonas. **B** – Valores do Índice de Cobertura Vegetal e Desmatamento (ICVD) e de seus componentes, desmatamento e cobertura vegetal, para os municípios mais expostos do estado do Amazonas.

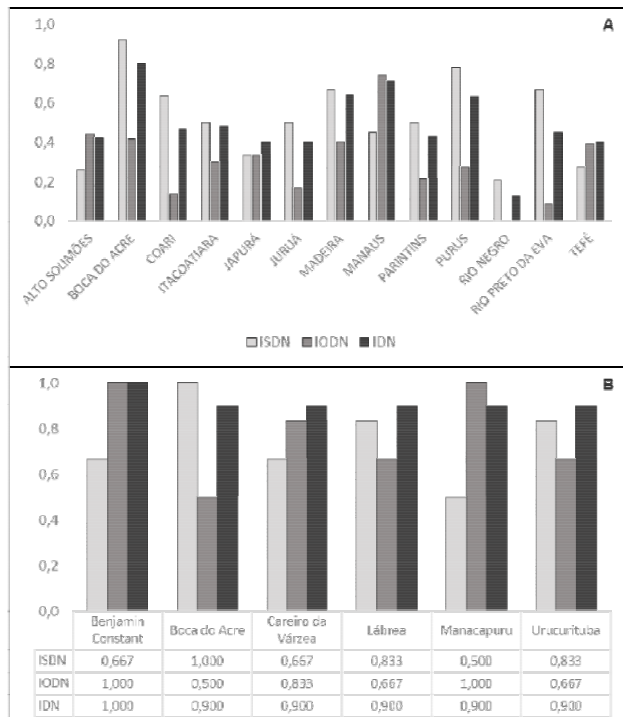
Ainda na Exposição, foram abordadas tanto a ocorrência quanto a susceptibilidade dos municípios aos desastres através do Índice de Desastres Naturais (IDN). O mapa 2 mostra que as Regiões Sul, Sudoeste e a porção Leste do Amazonas apresentaram maior exposição aos desastres. As microrregiões de Manaus, Madeira, Purus, Boca do Acre e parte do Alto Solimões foram as que apresentaram os maiores valores no IDN. As regiões menos expostas foram a Norte, Central e parte da Nordeste.

## Índice de Desastres Naturais de Origem Meteorológica (IDN)



**Mapa 2.** Distribuição dos valores municipais do Índice de Desastres Naturais (IDN) para o estado do Amazonas. As cores representam a gradação de exposição relacionada ao IDN – do bege, menos exposto, até o vermelho, mais exposto.

Dentre as microrregiões mais expostas aos desastres, a susceptibilidade, que engloba a série histórica de dias consecutivos secos e o percentual da população residindo em áreas de risco, foi o que mais influenciou o IDN em Boca do Acre, Madeira e Purus (gráfico 2A). Essa tendência também foi observada para a maioria das microrregiões. Ainda dentre as mais expostas, apenas o Alto Solimões e Manaus apresentaram maior peso da ocorrência de desastres para o cômputo final do IDN, ou seja, nesses locais a frequência dos desastres e os óbitos relacionados apresentaram papel preponderante (gráfico 2A). Os municípios mais expostos aos desastres no Amazonas foram Benjamin Constant, Boca do Acre, Careiro da Várzea, Lábrea, Manacapuru e Urucurituba (gráfico 2B). Observa-se que para Benjamin Constant, Careiro da Várzea e Manacapuru, a ocorrência de desastres foi mais importante para definir o IDN, enquanto para os demais, a susceptibilidade aos desastres teve maior peso.



**Gráfico 2. A** - Valores médios do Índice de Desastres Naturais (IDN) e de seus componentes, Índice de Susceptibilidade a Desastres Naturais (ISDN) e Índice de Ocorrência de Desastres Naturais (IODN), para as microrregiões do estado do Amazonas. **B** - Valores do Índice de Desastres Naturais (IDN) e de seus componentes, Índice de Susceptibilidade a Desastres Naturais (ISDN) e Índice de Ocorrência de Desastres Naturais (IODN), para os municípios mais expostos do estado do Amazonas.

A partir da conjugação do ICVD com o IDN, foi possível obter o Índice de Exposição (IE) dos municípios do Amazonas (Mapa 3). De maneira geral, nota-se que o Estado apresenta um grau de vulnerabilidade no quesito exposição bastante reduzido, o que se refletiu na distribuição espacial do IE de forma heterogênea pelos municípios. Entretanto, ainda é possível perceber as maiores exposições se concentrando nas Regiões Leste e Sul, com alguns municípios se destacando na área Central. Esta porção do Estado, juntamente com a Região Norte, foram as que apresentaram os municípios menos expostos.