

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA  
SECRETARIA DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS



# Resumo Executivo

BRASILIA, 2015

**GOVERNO FEDERAL  
PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA  
SECRETARIA DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS**

**RESUMO EXECUTIVO**

**BASES CONCEITUAIS E COMPILAÇÃO DOS ESTUDOS**

Universidade Federal de Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba e Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

Coordenação Técnica: Carlos de Oliveira Galvão e Cybelle Frazão Costa Braga

Equipe Técnica: Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga, Iana Alexandra Alves Rufino, Zédna Mara de Castro Lucena Vieira, Marília Silva Dantas Rocha

**ESTUDOS DO PROJETO BRASIL 2040**

**CENÁRIOS CLIMÁTICOS**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – INPE/MCTI

Coordenação Técnica: Chou Sin Chan

Consultores: Jorge Luis Gomes, Daniela Rodrigues, Adan J. Silva, André Lyra, Caroline Mourão, Claudine Dereczynski, Diêgo Campos, Diego Chagas, Gracielle Chagas, Gustavo Sueiro, Isabel Pilotto e Priscila Tavares

**RECURSOS HÍDRICOS**

Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura - FCPC

Coordenação Técnica: Prof Eduardo Sávio Martins e Prof Francisco de Assis de Souza Filho

**AGRICULTURA**

Fundação Eliseu Alves

Coordenação Técnica: Cláudio Humberto Amâncio, José Eduardo B A Monteiro, Giampaolo Queiroz Pellegrino e Leila Harfuch

**ENERGIA**

Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos – COPPETEC

Coordenação Técnica: Roberto Schaeffer, Alexandre Szklo, André F P Lucena e Rafael Kelman

**INFRAESTRUTURA URBANA E COSTEIRA**

Fundação Casimiro Montenegro Filho - FCMF

Coordenação Técnica: Prof Wilson Cabral de Sousa Júnior

**TRANSPORTES**

Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos – COPPETEC

Coordenação Técnica: Prof Emilio Lèbre La Rovere e Denise da Silva de Sousa

## APRESENTAÇÃO

A mudança do clima global é o maior desafio à ação concertada da humanidade neste início de século. A trajetória de desenvolvimento do Brasil e dos demais países depende do grau de alteração das variáveis climáticas e de sua distribuição no espaço. Há consenso em que, mesmo ante a incerteza relativa à dimensão e distribuição espacial dos fenômenos climáticos, é preciso avançar em ações que aumentem a resiliência das estruturas que balizam a vida e a economia.

A Subsecretaria de Desenvolvimento Sustentável da Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (SAE-PR) encomendou a instituições nacionais de excelência simulações a partir de modelos climáticos globais. As dificuldades e desafios para elaborar um estudo tão abrangente eram grandes, o que requereu o envolvimento de diversas áreas do conhecimento humano, tais como: engenharias, agricultura, economia, recursos hídricos, climatologia e sociologia. O objetivo era estimar como as mudanças climáticas afetariam os setores econômicos em diferentes horizontes e sugerir estratégias de prevenção e adaptação dos diferentes sistemas que poderiam ser afetados. Os estudos foram desenvolvidos para subsidiar processos relevantes no âmbito da Política Nacional sobre Mudança do Clima, em particular, o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima, em fase de conclusão no governo federal.

O projeto denominado “BRASIL 2040: cenários e alternativas de adaptação à mudança do clima” é constituído por quatro etapas. A primeira etapa consistiu na aplicação de dois dos mais de quarenta modelos de clima global disponíveis para, a partir de suas projeções e com base em dois cenários distintos, derivar hipóteses de comportamento climático para o território brasileiro nos períodos de 2011- 2040; 2041-2070 e 2071-2100 .

A segunda etapa do estudo identificou os impactos de cada um dos cenários climáticos sobre os recursos hídricos. Isso é crucial, pois quase todos os setores econômicos e as concentrações humanas sofrem impactos, não somente por variações de temperatura, mas, sobretudo, por variações na disponibilidade hídrica.

A terceira etapa analisou os impactos sobre os recursos naturais e sobre alguns setores econômicos, considerando variações climáticas e disponibilidade de recursos hídricos. Isso foi feito relacionando as alterações das principais variáveis climáticas – temperatura e precipitação – com produção de setores econômicos e infraestrutura instalada.

A quarta etapa do estudo consistiu na identificação de algumas medidas de adaptação ao cenário associado às projeções. Tais medidas envolvem estruturas caras (por exemplo: barragens para armazenar água ou construção de diques em zonas costeiras), mas contemplam também medidas mais simples como, por exemplo, sistemas de alerta de riscos, mudanças de práticas agrícolas ou organização de grupos sociais.

A modelagem climática global é um campo de desenvolvimento recente, caracterizado tanto pelo elevado número de variáveis naturais em processo de co-interação, quanto pela incerteza sobre o comportamento futuro de variáveis antrópicas, a mais importante delas relativa aos níveis de gases de efeito estufa na atmosfera. A tradução da escala em que são elaborados os modelos globais para uma escala menor do território brasileiro também depende de metodologia desenvolvida recentemente, em permanente processo de ajuste e refinamentos. A modelagem e as variáveis de disponibilidade hídrica padecem das mesmas restrições.

Nesse sentido, é importante expressar de forma clara e compreensível a incerteza associada a tais modelagens utilizadas nos estudos do BRASIL 2040 para que os resultados das simulações sejam vistos, compreendidos e utilizados na exata dimensão de sua capacidade preditiva. Em cada estudo temático são apresentadas a metodologia, os resultados e as incertezas presentes nas simulações, comuns a pesquisas em áreas que se situam na fronteira do conhecimento.

A SAE-PR disponibiliza, neste material, um Resumo Executivo dos 37 documentos produzidos no âmbito do projeto “BRASIL 2040: cenários e alternativas de adaptação à mudança do clima”, em linguagem acessível, para permitir à sociedade se qualificar e participar desse debate. A despeito das eventuais lacunas que um estudo dessa magnitude, realizado de forma inédita no país, possa apresentar, os seus resultados demonstram que é preciso não só incorporar as mudanças climáticas no planejamento de longo prazo, mas também avançar em ações que aumentem a resiliência das estruturas econômicas e sociais do país visando o seu desenvolvimento sustentado.

## **SOBRE AS INCERTEZAS DOS PROGNÓSTICOS**

No primeiro capítulo deste documento - *Bases Conceituais* - são apresentadas, em grandes linhas, as incertezas presentes nos prognósticos, particularmente as decorrentes das simulações climáticas, reforçadas nos capítulos sobre *Prognósticos Climáticos* e *Recursos Hídricos*. Em cada estudo setorial, apresentados nos capítulos subsequentes, as fontes de incerteza também são especificadas, para dar ao leitor a melhor dimensão das imprecisões inerentes às estimativas.

Os prognósticos de impactos das mudanças climáticas futuras, no horizonte de 2040, para diversos setores da sociedade brasileira, tiveram como principal finalidade embasar a construção das estratégias de adaptação. As estimativas de impactos setoriais, sob os diversos cenários climáticos ou socioeconômicos, não tiveram o propósito de fornecer valores absolutos para as variáveis indicadoras dos impactos, mas sim indicar tendências e ordens de magnitude dos impactos que pudessem orientar estratégias de adaptação. É nessa perspectiva que as estimativas de impacto são aceitáveis e valiosas e devem ser tomadas em consideração.

As estratégias de adaptação propostas em cada estudo setorial, pensadas considerando os diversos cenários climáticos e setoriais futuros, incluindo aqueles extremos, são o produto mais importante do BRASIL 2040. As estratégias são diretrizes que a sociedade brasileira deve seguir com o objetivo não só de minimizar os eventuais impactos negativos do clima futuro, mas também de aproveitar as oportunidades que surgirão. Oferecem uma singular oportunidade de reflexão sobre a gestão da nossa sociedade, não apenas pelos agentes públicos, mas por todos os agentes sociais e econômicos.

Estudos de planejamento estratégico, como este, devem necessariamente levar em conta cenários de ocorrência plausível, incluindo extremos. As estimativas e prognósticos decorrentes das simulações realizadas usando essas condições extremas devem ser - e foram - consideradas na construção das estratégias de adaptação. Outros condicionantes setoriais, de difícil estimativa e quantificação, também embasaram as simulações de impacto. As estimativas resultantes, como já mencionado, são possibilidades que guiaram a construção das estratégias de adaptação e apontaram as tendências. Portanto, não são estimativas precisas dos impactos e não devem ser tomadas isoladamente como base para inferência e, principalmente, não devem ser usados como *previsão* do futuro.

Os estudos também oferecem dados sobre alguns setores da economia, que podem ser utilizados em outros trabalhos e estimativas. A identificação de lacunas de informação ou de métodos, de fontes de incerteza e limitações dos modelos, sejam climáticos ou de avaliação de impactos, propicia à comunidade técnica e científica um horizonte para novos estudos e para o aprofundamento das estratégias de adaptação à mudança do clima.

# BASES CONCEITUAIS

## 1. BASES CONCEITUAIS

O *sistema climático* é composto pela atmosfera, a superfície terrestre, as geleiras e calotas polares, os oceanos e outros corpos de água, e os seres vivos. O componente atmosférico – temperatura, pressão, insolação, nebulosidade, precipitação e ventos – caracteriza o *clima* de uma região, frequentemente definido como a média das condições atmosféricas para uma série de 30 anos.

O clima da Terra está sempre mudando com o tempo, em decorrência de processos naturais como a variação da órbita terrestre, erupções vulcânicas e alterações na radiação solar. É o que se chama *variabilidade climática natural*. Após absorver energia solar, a Terra emite calor no espaço e parte desse calor é absorvido pelos gases presentes na atmosfera, que o redistribuem através das circulações atmosférica e oceânica. Esse processo natural, denominado *efeito estufa*, é o responsável pela manutenção da temperatura média mundial.

Desde a era pré-industrial, o crescimento econômico e populacional vem aumentando as emissões de gases de efeito estufa (GEE), levando a concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) sem precedentes, pelo menos nos últimos 800 mil anos. A intensificação do efeito estufa natural causa inequívoco aquecimento do sistema climático: a média global das anomalias das temperaturas combinadas das superfícies terrestre e oceânica mostra uma variação de +0,85°C no período de 1850 a 2012; e a taxa de aumento do nível do mar foi maior nesse período (aumento médio global de 0,19 m) do que nos dois milênios anteriores (IPCC, 2014a). Assim, a *mudança climática* é definida como uma mudança no estado do clima, direta ou indiretamente atribuída a atividades humanas que alteram a composição da atmosfera global e que ocorre em adição à variabilidade climática natural observada em períodos de tempo comparáveis (IPCC, 2014b).

Nas últimas décadas, a mudança climática tem causado impactos sobre os sistemas natural e humano, em todos os continentes e nos oceanos. Por exemplo, em muitas regiões, mudanças na distribuição pluviométrica e no degelo estão alterando os sistemas hidrológicos, afetando os recursos hídricos, em termos de quantidade e qualidade (cheias e secas); muitas espécies terrestres e aquáticas mudaram suas atividades sazonais, seus padrões migratórios e sua abundância; tem havido maior ocorrência de ondas de calor, ondas de frio, furacões e ciclones tropicais ou extratropicais (IPCC, 2014a).

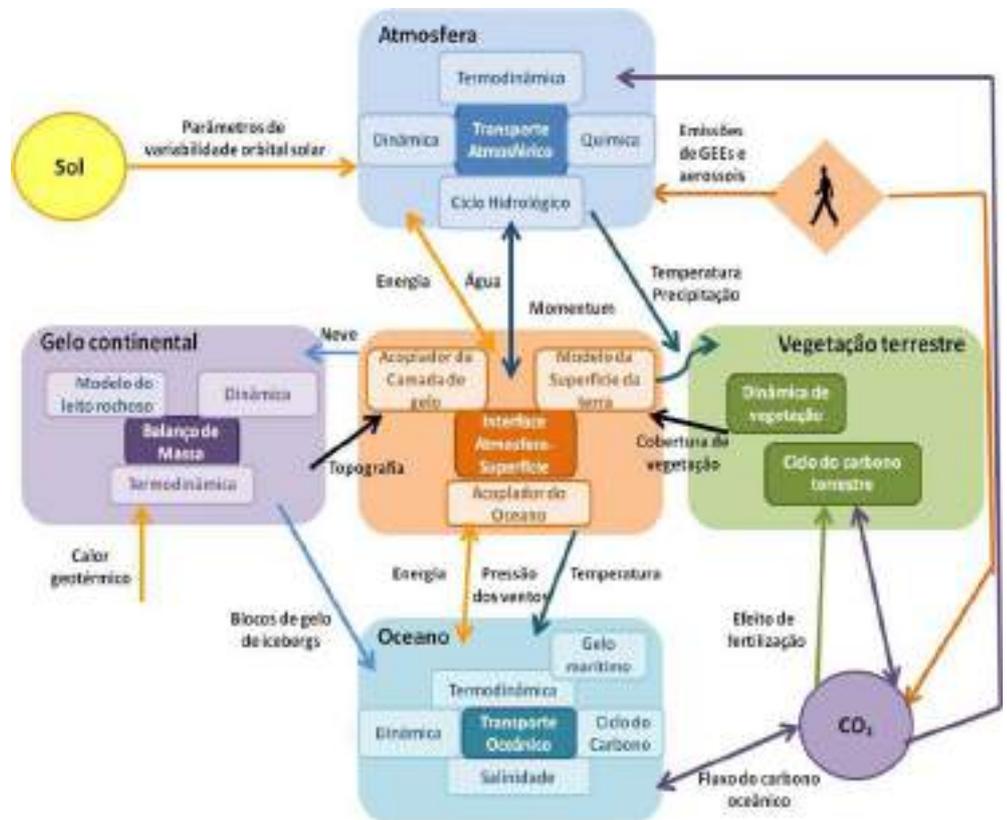
Nesse contexto, torna-se premente o conhecimento das **tendências futuras** do comportamento do sistema climático e dos impactos que podem advir das mudanças, de modo a permitir o planejamento de políticas de adaptação a essas mudanças e de mitigação dos seus efeitos.

# BASES CONCEITUAIS

## 1.1 Modelos Climáticos

Os modelos climáticos são a principal ferramenta para a obtenção de projeções do clima futuro. Constituem-se em representações matemáticas do sistema climático (e de suas interações com elementos externos, como o Sol e outras fontes), baseadas em leis bem estabelecidas da Física e em dados oriundos de observações; são expressos em códigos computacionais e processados em supercomputadores (BETTS *et al.*, 2011). Estruturalmente (Figura 1.1), um modelo climático é um conjunto de modelos acoplados, que descrevem, respectivamente, os processos físicos na atmosfera, no oceano e na superfície terrestre e as interações entre esses componentes do sistema climático.

Figura 1.1 Representação esquemática da estrutura de um modelo climático

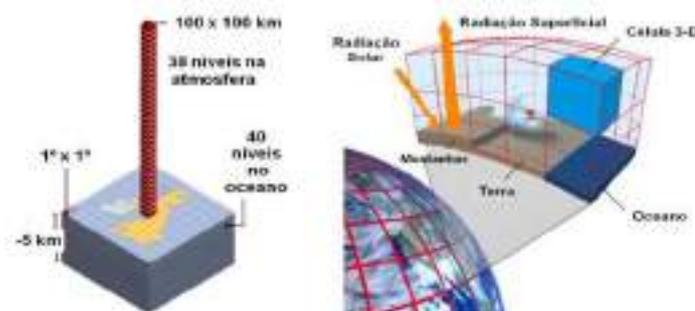


Fonte: Adaptado de EASTERBROOKS; JOHNS (2009).

### 1.1.1 Modelos climáticos globais e regionais

Nos *modelos climáticos globais* (*Global Climate Models – GCM*), o globo terrestre é dividido horizontalmente em uma grade, com células (com lado da ordem de 100 a 300 km) que abrangem toda a superfície do planeta, a atmosfera e os oceanos, e verticalmente em camadas que abrangem de 19 a 38 níveis na atmosfera e de 20 a 40 níveis nos oceanos, conforme ilustrado na Figura 1.2. Desse modo, são formadas células tridimensionais, para as quais os cálculos dos processos físicos são efetuados. Ainda é considerada uma quarta dimensão: o tempo, dividido em intervalos que definem a frequência de repetição dos cálculos (GOOSSE, 2015).

Figura 1.2 Células, camadas e componentes em um modelo climático global

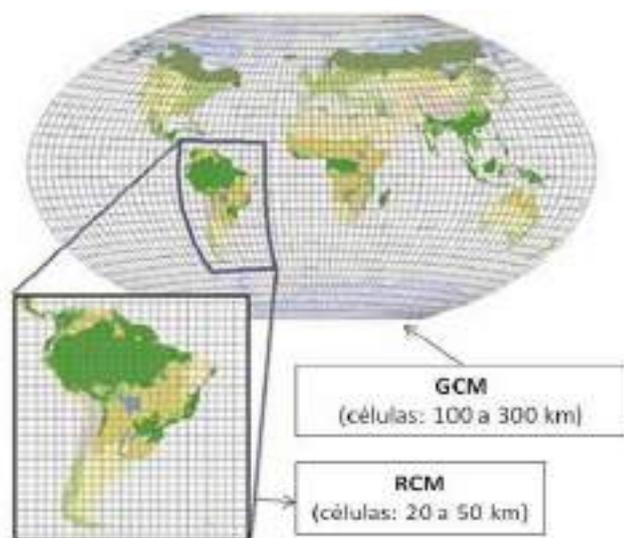


Fonte: Adaptado de GOOSSE (2015).

O sistema climático inclui uma grande variedade de processos físicos que interagem, em diferentes escalas de tempo e espaço. Em função das limitações dos modelos, muitos desses processos não podem ser bem resolvidos matematicamente na grade adotada e precisam ser *parametrizados*, ou seja, são incluídos nos modelos por meio de aproximações baseadas em conhecimento especializado (RANDALL *et al.*, 2007).

Para observar como as mudanças climáticas ocorrem em escala mais detalhada que a permitida pelos GCMs, e como diferentes níveis de concentrações de gases de efeito estufa podem afetá-las, é necessário aumentar a resolução espacial do GCM na área de interesse, possibilitando a representação de características, como a região costeira e as montanhas, e de processos atmosféricos de menor escala. Para isso, usam-se técnicas de *downscaling*, ou seja, de redução da escala da grade. Uma dessas técnicas é a *modelagem aninhada*, ou *dinâmica* (Figura 1.3), na qual o *modelo climático regional* (*Regional Climate Model – RCM*) fica *aninhado* em um GCM, cujos resultados são usados como condições iniciais e de contorno para o RCM (BETTS *et al.*, 2011). Outras técnicas de *downscaling* são: *Simples* – onde é feita a interpolação dos resultados obtidos na grade maior, adaptando-os à realidade regional/local – e *Estatística* – que relaciona, estatisticamente, as características do clima global ao clima regional/local.

Figura 1.3 Modelo climático regional na modelagem aninhada



Fonte: Adaptado de BETTS *et al.* (2011).

## 1.1.2 Incertezas na Modelagem Climática

A confiabilidade de um modelo climático, seja ele global ou regional, baseia-se em três pontos principais: (a) o fato de se fundamentar em leis bem estabelecidas da Física; (b) a sua capacidade de simular importantes aspectos do clima atual (tal avaliação é

feita através da comparação dos resultados das simulações com observações da atmosfera, dos oceanos, da superfície terrestre, etc.; ou através da comparação dos resultados de múltiplos modelos climáticos); e (c) a sua capacidade em reproduzir características de climas e mudanças climáticas que ocorreram no passado (RANDALL *et al.*, 2007). Ao atender a esses três pontos, os modelos climáticos são considerados capazes de prover consistentes estimativas quantitativas de mudanças climáticas futuras, com base em diferentes projeções de emissão de gases de efeito estufa (IPCC, 2014a).

No entanto, é necessário considerar que as projeções feitas pelos modelos climáticos encerram incertezas, devidas ao conhecimento e/ou representação matemática imperfeitos sobre: (a) todos os processos físicos relevantes; (b) a sensibilidade do modelo às condições iniciais adotadas; (c) os valores futuros de variáveis que podem afetar o sistema climático (notadamente, as emissões de gases de efeito estufa); e (d) como mudanças nessas variáveis se traduzem em mudanças no clima (BURKE *et al.*, 2015).

Tais incertezas se tornam maiores no caso dos modelos regionais, visto que são fortemente dependentes das condições de contorno e dos métodos utilizados para adequar as variáveis do RCM à menor resolução espacial do GCM; assim, erros climáticos de larga escala nos GCMs, não apenas são absorvidos pelos RCMs, mas podem ser amplificados, pela sua maior resolução espacial (PIELKE SR., 2012). Além disso, se o RCM for aninhado em apenas poucos GCMs, os cenários de alta resolução não cobrem a completa gama de mudanças projetadas que um maior número de GCMs poderia indicar como futuros plausíveis, deste modo aumentando as incertezas dos resultados obtidos (HEWITSON *et al.*, 2014).

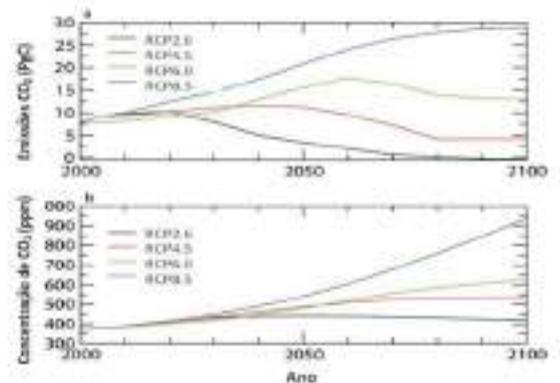
## 1.1.3 Projeções de Mudanças Climáticas

Como não é possível prever as emissões futuras dos gases de efeito estufa, as quais dependem de fatores como alterações demográficas e decisões sobre a produção de energia, as projeções de mudanças climáticas se baseiam em cenários que representam diferentes possíveis níveis das emissões.

# BASES CONCEITUAIS

Assim, a comunidade científica, por meio do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC), definiu um conjunto de cenários – denominados Trajetórias de Concentração Representativa<sup>1</sup> (*Representative Concentration Pathways – RCPs*) – que são identificados por sua forçante radiativa total, expressa em  $W/m^2$ , a ser atingida durante o (ou próximo ao final do) século XXI: *RCP2.6* (cenário de mitigação, levando a um nível muito baixo da forçante), *RCP4.5* e *RCP6.0* (dois cenários de estabilização) e *RCP8.5* (cenário com emissões muito altas de gases de efeito estufa) (IPCC, 2014a). Cada RCP provê conjuntos de dados, especialmente distribuídos, de mudanças no uso da terra e de emissões setoriais de poluentes do ar e especifica as concentrações anuais de gases de efeito estufa e as emissões antropogênicas até o ano 2100 (BURKETT *et al.*, 2014). A Figura 1.4 apresenta as diferentes emissões e concentrações de  $CO_2$ , para os cenários *RCP2.6*, *RCP4.5*, *RCP6.0* e *RCP8.5*.

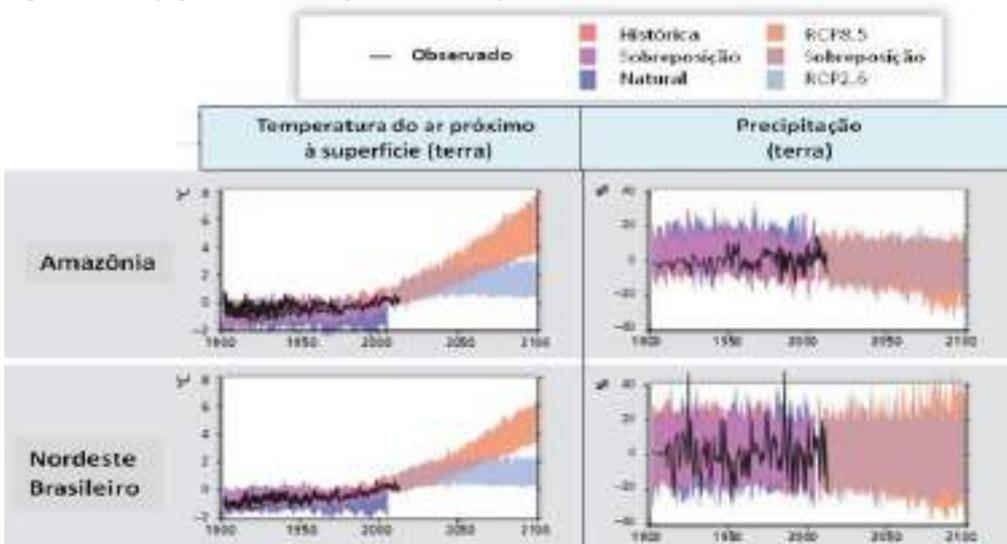
Figura 1.4 Emissões e concentração de dióxido de carbono para as RCPs



Fonte: Adaptado de IPCC (2014a). Obs: 1 PgC = 1 bilhão de toneladas de carbono.

Verifica-se, portanto, que a projeção da concentração de dióxido de carbono na atmosfera – e, por decorrência, a projeção das mudanças climáticas – depende do cenário escolhido. Como exemplo das projeções de mudanças climáticas (bem como algumas das incertezas) produzidas pelos modelos, a Figura 1.5 apresenta os resultados obtidos para o comportamento da temperatura e da precipitação na Região Amazônica e no Nordeste Brasileiro até o final deste século, considerando os cenários *RCP2.6* e *RCP8.5*. Verifica-se que, em relação ao período 1986-2005, as projeções de aumento de temperatura, para a Amazônia, variam de  $0,6^{\circ}C$  a  $2^{\circ}C$  (*RCP2.6*) e de  $3,6^{\circ}C$  a  $5,2^{\circ}C$  (*RCP8.5*), enquanto para o Nordeste, os aumentos de temperatura variam de  $0,6^{\circ}C$  a  $2^{\circ}C$  (*RCP2.6*) e de  $2,2^{\circ}C$  a  $7^{\circ}C$  (*RCP8.5*). Já as projeções para a precipitação indicam variações entre +10% e -25% para a Amazônia e entre +30% e -30% para o Nordeste Brasileiro, tornando difícil identificar qual mudança no padrão de precipitação é mais provável de ocorrer (MAGRIN *et al.*, 2014).

Figura 1.5 Projeções de mudanças climáticas para a Amazônia e o Nordeste Brasileiro



Fonte: Adaptado de MAGRIN *et al.* (2014).

**Obs.:** Linhas pretas indicam várias estimativas a partir de dados observados; áreas sombreadas mostram a variação entre simulações com modelos climáticos considerando: mudanças históricas nas forçantes antropogênicas e natural (63 simulações); mudanças históricas na forçante natural, apenas (34 simulações); o cenário de emissões *RCP2.6* (63 simulações); e o cenário de emissões *RCP8.5* (63 simulações).

<sup>1</sup> Cenários de emissões de GEE e de concentrações atmosféricas, emissões de poluentes e uso da terra são fruto da população, atividade econômica, energia, padrões de uso da terra, recursos tecnológicos e políticas climáticas (IPCC, 2014a).

## 1.2 Estudos de Impactos de Mudança Climática

Impactos climáticos podem ser definidos como as consequências ambientais e socioeconômicas das mudanças climáticas (IPCC, 2014a). Os estudos de impactos de mudanças climáticas podem ser classificados em *estudos de detecção e atribuição de impactos*, ou *estudos de impactos futuros*. Os primeiros buscam avaliar a concordância entre as mudanças observadas em um sistema e suas causas (isto é, se são devidas às mudanças climáticas ou a outros fatores), dizendo respeito, portanto, aos impactos já ocorridos, e baseando-se, principalmente, em dados de monitoramento (no longo prazo) de variáveis ambientais. Enquanto a detecção refere-se à identificação de se um sistema mudou em resposta à mudança climática, a atribuição refere-se à magnitude da contribuição da mudança climática a essa mudança no sistema, com relação à influência de outros fatores externos e à variabilidade natural. Os *estudos de impactos futuros* buscam prever as respostas de sistemas a mudanças climáticas projetadas para o futuro; neste caso, os estudos de detecção e atribuição de impactos fornecem uma maneira de validar e refinar essas previsões (JONES *et al.*, 2014).

Em sua maioria, os estudos de impactos futuros fazem uso de *modelos de impactos*, que, tipicamente, produzem simulações matemático-computacionais de sistemas do mundo real, calibradas e validadas a partir de informações obtidas em experimentos e analogias, e que utilizam, como dados de entrada, as projeções de modelos climáticos.

Experimentos envolvem a mudança deliberada de um ou mais fatores do sistema climático que afetam o objeto de estudo, mantendo os demais fatores constantes, de modo a refletir condições futuras (JONES *et al.*, 2014). Analogias fazem uso de variações existentes e são usadas quando experimentos controlados se tornam impraticáveis.

Dois tipos de analogias são utilizados nas projeções de climas e impactos: a *analogia espacial*, que identifica

outra parte do mundo já sujeita a condições climáticas similares àquelas antecipadas para o futuro, e a *analogia temporal*, que usa mudanças ocorridas no passado para fazer inferências sobre mudanças no futuro (JONES *et al.*, 2014).

Atualmente, são usados os modelos integrados de identificação de impactos (*Integrated Assessment Models – IAMs*) que agregam, aos modelos climáticos, modelos biofísicos e socioeconômicos, tanto quantitativos quanto descritivos (cenários). Permitem a modelagem dos impactos futuros sobre recursos hídricos, biodiversidade e ecossistemas terrestres, águas interiores, oceanos e geleiras, assim como sobre infraestrutura urbana, produtividade agrícola, saúde, crescimento econômico e pobreza, entre outros (JONES *et al.*, 2014).

Os IAMs permitem “integração vertical” (ou seja, cobrem toda a cadeia causal, desde atividades socioeconômicas que aumentam emissões, até concentração de gases de efeito estufa, impactos climáticos e adaptações) e “integração horizontal” (ou seja, consideram as interrelações entre diferentes categorias de impactos, adaptações e fatores exógenos como o desenvolvimento econômico e o crescimento populacional), além do tratamento consistente das incertezas. Sua principal desvantagem é que se fundamentam em um número limitado de medidas universais de impactos, o que pode fazer com que as avaliações de impactos não sejam significativas (OPENHEIMER *et al.*, 2014).

As incertezas compõem todos os níveis de definição de impactos e ocorrem em cascata, visto que as incertezas dos modelos climáticos – projeções de emissões futuras, concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, mudanças climáticas projetadas etc., utilizadas como entrada dos modelos de impactos – se somam às incertezas sobre as condições socioeconômicas futuras, às incertezas sobre as interações entre as mudanças climáticas e os sistemas natural e humano, e às incertezas sobre o potencial e distribuição de impactos climáticos (CRAMER *et al.*, 2014).

## 1.3 Adaptação à Mudança Climática

A adaptação à mudança climática se refere ao ajustamento de sistemas naturais ou humanos, ao clima real ou esperado e seus efeitos. Envolve a redução de riscos e vulnerabilidades, a busca de oportunidades e a construção da capacidade de nações, regiões, cidades, setores privados, comunidades, indivíduos e sistemas naturais para enfrentar os impactos climáticos, bem como a mobilização dessa capacidade para implementação de decisões e ações (NOBLE *et al.*, 2014). Risco é o potencial para consequências onde algum valor humano (incluindo os seres humanos) está ameaçado e onde o resultado é incerto; é geralmente representado como a probabilidade de ocorrência de eventos perigosos, multiplicada pelas consequências da ocorrência desses eventos (IPCC, 2014c). Vulnerabilidade é a propensão ou predisposição de um sistema para ser adversamente afetado, em função do caráter, magnitude e taxa da variação climática à qual o sistema está exposto, bem como da sua sensibilidade e capacidade de adaptação (resiliência) (NOBLE *et al.*, 2014).

Os estudos de adaptação às mudanças climáticas buscam identificar os fatores que determinam a natureza dos (e a vulnerabilidade aos) riscos climáticos, bem como as opções de adaptação para reduzir tais riscos. Podem ser: (a) “*Top-down*”, quando usados para medir o potencial de impactos de mudanças climáticas, usando cenários e modelos para identificar as necessidades de adaptação; (b) “*Bottom-up*”, quando usados para determinar a vulnerabilidade de diferentes grupos a atuais e/ou futuras mudanças climáticas e suas opções de adaptação, utilizando a intervenção de grupos de interesse e analisando condições socioeconômicas e de subsistência (tendem a ser específicos para uma localidade/grupo); (c) *Políticos*, que avaliam a política e os planos atuais quanto à sua efetividade sob mudanças climáticas, utilizando uma estrutura de gerenciamento de risco. Crescente atenção vem sendo dada à capacidade institucional e ao ambiente político visto que ambos podem influenciar a vulnerabilidade e determinar o tipo e o sucesso de diferentes opções de adaptação. Na prática, os estudos de adaptação têm se tornado crescentemente complexos, combinando elementos de todas as abordagens (NOBLE *et al.*, 2014).

As medidas de adaptação à mudança climática combinam subconjuntos de atividades como (a) desenvolvimento de infraestrutura; (b) otimização de processo tecnológico; (c) mudança ou reforço institucional e comportamental; (d) gestão integrada dos recursos naturais, como bacias hidrográficas e zonas costeiras; (e) serviços financeiros, incluindo a transferência de riscos; e (f) sistemas de informação.

## Referências

- BETTS, R. et al. (2011) Como modelamos o clima. In: MARENGO, J. A. et al. *Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil – Análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia*. Brasília: MCT/INPE/MOHC.
- BURKE, M. et al. (2015) Incorporating climate uncertainty into estimates of climate change impacts. *The Review of Economics and Statistics*, 97(2): 461-471.
- BURKETT, V.R. et al. (2014) Point of departure. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 169-194.
- CRAMER, W. et al. (2014) Detection and attribution of observed impacts. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 979-1037.
- EASTERBROOK, S. M.; JOHNS, T. C. (2009) Engineering the software for understanding climate change. *Comput. Sci. Eng.*, 11, 65–74.
- GOOSSE, H. (2015) *Climate System Dynamics and Modelling*. Cambridge: Cambridge University Press.
- HEWITSON, B. et al. (2014) Regional context. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 1133-1197.
- IPCC (2014a) *Climate Change 2014: Synthesis Report – Summary for Policymakers*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (2014b) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Summary for Policymakers*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (2014c) *Climate Change 2014: Glossary*. Cambridge: Cambridge University Press.
- JONES, R.N. et al. (2014) Foundations for decision making. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 195-228.
- MAGRIN, G.O. et al. (2014) Central and South America. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 1499-1566.
- NOBLE, I.R. et al. (2014) Adaptation needs and options. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 833-868.
- OPPENHEIMER, M. et al. (2014) Emergent risks and key vulnerabilities. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 1039-1099.
- PIELKE SR., R. A. (2012) Regional Climate Downscaling: What’s the point? *Eos*, v. 93, n. 5. pp. 52-53.
- RANDAL, D. A. et al. (2007) Climate Models and Their Evaluation. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press.

## 2. BRASIL 2040: CENÁRIOS E ALTERNATIVAS DE ADAPTAÇÃO À MUDANÇA DO CLIMA

Os estudos do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) indicam alterações no clima que, conseqüentemente, impactam direta e indiretamente grande parte da população, os recursos hídricos, a infraestrutura urbana e rural, as zonas costeiras, as florestas e a biodiversidade, bem como os setores econômicos. Essas mudanças impõem grandes desafios e oportunidades ao desenvolvimento econômico e social brasileiro e ao seu planejamento. Entre outras questões, pode-se perguntar: (i) Qual(is) cenário(s) social, econômico, ambiental e climático deve(m) ser considerado(s) nessa agenda?; (ii) O país está preparado para enfrentar esses novos cenários? e (iii) Como se dará a adaptação para esse(s) cenário(s)?

Nesse sentido, pensar em uma agenda de longo prazo para o país na qual o poder público e a sociedade se preparem para lidar com o novo cenário global do clima é fundamental. O BRASIL 2040 é um projeto que foi desenvolvido com o objetivo de responder essas perguntas e dar uma contribuição ao debate sobre Mudanças Climáticas consolidando a competência da SAE-PR de elaborar subsídios para a preparação de ações do governo (Decreto nº 6.517/2008).

## 2.1 O Projeto

O projeto é composto por 6 subtemas: cenários climáticos, recursos hídricos, infraestrutura urbana e costeira, agricultura, transporte e energia (Figura 2.1). A partir de pressupostos e desafios destacados na Figura 2.2, o estudo foi desenvolvido nas seguintes etapas:

- Geração de um conjunto de cenários climáticos previstos para o Brasil nos horizontes 2011-2040, 2041-2070, e 2071-2100.
- Identificação e medição dos impactos de cada um dos cenários climáticos sobre os recursos hídricos e proposição de estratégias de adaptação.
- Análise dos impactos e proposição de estratégias de adaptação nos setores de infraestrutura urbana e costeira, agricultura, transporte e energia, a partir das duas primeiras etapas, para o horizonte de 2040.

Os impactos são estimados relativamente a cenários de referência, isto é, cenários tendenciais sem a incorporação das variáveis alteradas pela mudança do clima. Os cenários de mudanças climáticas foram escolhidos para duas Trajetórias de Concentração Representativa (Representative Concentration Pathways - RCP): RCP4.5 (pressupõe um sistema em que medidas para redução de emissões são adotadas, assumindo-se a premissa de que o Brasil tomaria parte no esforço global de mitigação compatível com uma forçante radiativa de 4,5 W/m<sup>2</sup> em 2100) e RCP8.5 (pressupõe um sistema em que não há preocupação explícita com mitigação das emissões de GEE, o que levaria o mundo a uma forçante radiativa de 8,5 W/m<sup>2</sup> em 2100).

Figura 2.1 Componentes do Brasil 2040



Figura 2.2 Pressupostos e desafios do Brasil 2040



## 2.2 Equipes setoriais

Os resultados das componentes setoriais, apresentados na Tabela 2.1, foram gerados a partir de um conjunto de projeções climáticas e hidrológicas realizadas pelos grupos de cenários climáticos e recursos hídricos. Dessa forma, os resultados dependem intrinsecamente desses dados de entrada, que se encontram fora do escopo dos estudos setoriais de energia, agricultura, infraestrutura urbana e costeira e transportes. Portanto, deve-se observar que os resultados são função das projeções climáticas e hidrológicas.

Os capítulos apresentados a seguir são resumos construídos a partir dos relatórios dos estudos de cada setor do projeto BRASIL 2040. Maiores detalhes desses estudos podem ser encontrados no sítio da SAE-PR ([www.sae.gov.br](http://www.sae.gov.br)) na internet.

# BRASIL 2040

Tabela 2.1 Produtos setoriais do Brasil 2040

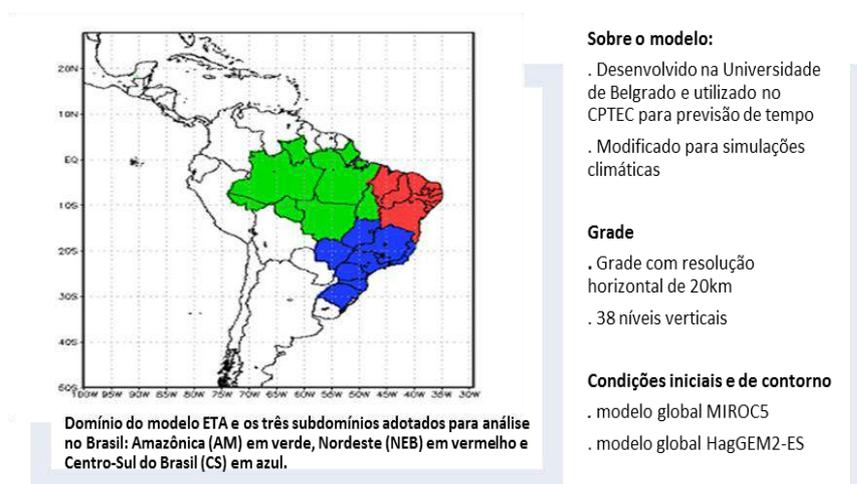
Componente	Produtos	Responsável
Cenários Climáticos	Estimativas de cenários climáticos para o Brasil usando-se o modelo regional de clima (ETA) com as condições de contorno dos modelos globais MIROC5 e HadGEM2-ES para o presente (1961-1990) e futuro (2011-2040). Estimativas presente e futura referentes à temperatura e precipitação e índices de extremos climáticos.	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (INPE/MCTI)
Recursos Hídricos	Identificação de se os modelos climáticos possuem habilidade em representar os padrões de variação do clima no século XX. Simulação de disponibilidade de recursos hídricos a partir das projeções climáticas para o futuro. Identificação de tendência e possíveis mudanças nos regimes anuais e sazonais das variáveis em análise. Elaboração de um portfólio de orientações gerais para o planejamento e gestão dos recursos hídricos considerando os cenários de disponibilidade hídrica gerados.	Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura - Universidade Federal do Ceará (FCPC/UFC)
Agricultura	Estabelecimento de linha de base de produção agropecuária e alocação de terra para o período 2011-2040. Geração de cenários para as principais culturas brasileiras em 2040. Análise comparativa das culturas nos cenários simulados para 2040 em relação à condição atual. Análise de produção agropecuária e alocação de terra com mudança do clima, para 2040, a partir de modelo econômico. Análise de vulnerabilidade econômica do sistema de produção das principais culturas brasileiras. Identificação e análise de possíveis medidas adaptativas.	Fundação Eliseu Alves
Energia	Construção de dois cenários de operação e expansão do sistema energético brasileiro até 2040 sem e com mudanças climáticas. Projeção da Demanda Elétrica. Simulação da operação do Sistema Interligado Nacional – SIN, sem e com mudanças climáticas. Avaliação de impactos e alternativas de adaptação para o sistema energético brasileiro.	Fundação Coordenação de Projetos Pesquisa e Estudos Tecnológicos – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPETEC/UFRJ)
Infraestrutura Urbana	Avaliação dos prováveis impactos de cenários de mudanças climáticas na infraestrutura urbana de drenagem por meio de indicadores de desempenhos das respectivas infraestruturas municipais. Identificação e hierarquização de estratégias de adaptação considerando os cenários de mudanças climáticas na infraestrutura urbana de drenagem.	Fundação Casimiro Montenegro Filho - Instituto Tecnológico de Aeronáutica (FCMF/ITA)
Infraestrutura Costeira	Mapeamento da vulnerabilidade socioambiental da costa brasileira, a partir do desenvolvimento de um índice compreensivo. Análise da exposição da infraestrutura portuária brasileira aos riscos climáticos, considerando cenários de elevação do nível do mar e regimes de onda associados.	Fundação Casimiro Montenegro Filho - Instituto Tecnológico de Aeronáutica (FCMF/ITA)
Transporte	Definição das Variáveis Climáticas Relevantes e definição dos hotspots. Caracterização da infraestrutura de transporte rodoviário federal relevante, atual e futura, nos hotspots. Análise dos impactos dos eventos climáticos sobre a infraestrutura de transporte rodoviário. Avaliação da vulnerabilidade da malha rodoviária nos hotspots e proposição de estratégias adaptativas.	Fundação Coordenação de Projetos Pesquisa e Estudos Tecnológicos – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPETEC/UFRJ)

### 3. CENÁRIOS CLIMÁTICOS

Os cenários climáticos foram produzidos com base em dados provenientes de um grupo de experimentos sobre mudanças climáticas, o Projeto de Comparação de Modelos Acoplados (*Coupled Model Intercomparison Project – CMIP5*), que provê informações para o IPCC. O CMIP5 disponibiliza simulações de vários modelos globais de diferentes centros climáticos no mundo. Os modelos globais utilizados foram o HadGEM2-ES, do Reino Unido (*Met Office Hadley Centre*) e o MIROC5, do Japão (*Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute*).

O modelo regional ETA (Figura 3.1) foi utilizado para refinar a escala da grade dos dois modelos globais para os cenários RCP4.5 e RCP8.5. O ETA é rodado operacionalmente no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE/MCTI), sobre a América do Sul, na forma de previsão numérica do tempo, e foi modificado para simulações climáticas. O modelo produziu simulações para os períodos 1961-1990, 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100 para as configurações descritas e domínio mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 Informações sobre o Modelo Regional ETA



#### 3.1 Clima Atual

A comparação dos dados observados de temperatura e precipitação com os simulados pelo modelo ETA aninhado em cada modelo global, para o período 1961-1990, permite que seja identificado o viés do modelo em simular o clima atual.

Com relação às temperaturas, os modelos subestimam os valores observados, em especial o ETA/MIROC5, mas a correlação espacial entre as simulações e os dados observados (Tabela 3.1) mostra que os padrões espaciais são bem representados espacialmente (a correlação perfeita é 1). Sobre a Amazônia os valores das correlações são menores, com valores abaixo de 0,40 para o modelo ETA/HadGEM2-ES.

Os modelos representam bem a distribuição espacial e temporal da precipitação observada, no entanto, superestimam a precipitação mensal na região Sudeste e a subestimam na região Sul e no leste do Nordeste do Brasil. No Nordeste, o ETA/MIROC5 expandiu a área de

seca. As correlações espaciais (Tabela 3.1) indicam que a precipitação é bem representada espacialmente nos dois períodos sazonais avaliados, o que garante que os principais sistemas atmosféricos responsáveis pela chuva (e para a temperatura) estão bem representados pelos modelos.

A detecção de viés na simulação de modelos atmosféricos é um procedimento usual, visto que esses são modelos que envolvem sistemas complexos e sujeitos a incertezas. Assim, existem dois pontos importantes a ressaltar: (a) as tendências de aumento/diminuição na magnitude das variáveis atmosféricas devem ser comparadas com os valores simulados pelos modelos no clima atual e não com os dados observados; e (b) a precipitação precisa ter o viés corrigido antes que seja utilizada como dado de entrada em modelos de avaliação de impactos nos estudos setoriais.

# BRASIL 2040

Tabela 3.1 Correlação espacial entre temperaturas máximas, mínimas e precipitação sazonal e dados observados para DJF (Dezembro, Janeiro e Fevereiro) e JJA (Junho, Julho e Agosto) para os três subdomínios no Brasil (AM-Amazônia, NEB-Nordeste do Brasil e CS-Centro Sul).

Temperatura Máxima						
Modelos	DJF			JJA		
	AM	NEB	CS	AM	NEB	CS
ETA/HadGEM2-ES	0,39	0,62	0,86	0,56	0,89	0,93
ETA/MIROC5	0,54	0,82	0,81	0,56	0,85	0,85
Temperatura Mínima						
Modelos	DJF			JJA		
	AM	NEB	CS	AM	NEB	CS
ETA/HadGEM2-ES	0,30	0,69	0,87	0,67	0,84	0,91
ETA/MIROC5	0,55	0,79	0,92	0,88	0,81	0,92
Precipitação						
Modelos	DJF			JJA		
	AM	NEB	CS	AM	NEB	CS
ETA/HadGEM2-ES	0,74	0,82	0,69	0,78	0,62	0,92
ETA/MIROC5	0,71	0,77	0,67	0,96	0,86	0,57

## 3.2 Clima Futuro

A simulação do modelo ETA aninhado nos dois modelos globais para os cenários de RCP8.5 e RCP4.5 indica como a temperatura e a precipitação podem se comportar no período de 2010 a 2099. Os dados simulados foram avaliados em termos de anomalias médias anuais. Anomalias apresentam as diferenças, absolutas ou relativas, entre os valores simulados pelos modelos para o clima futuro e atual.

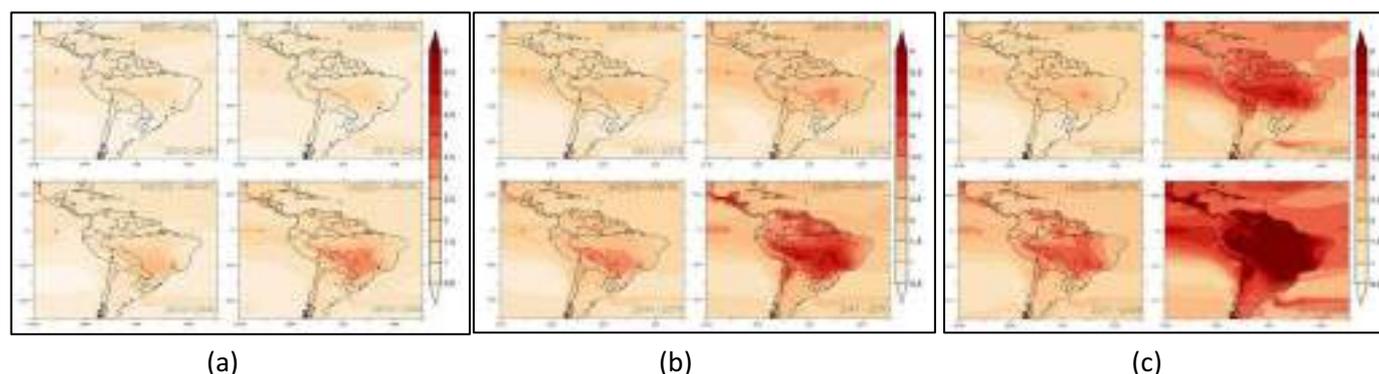
### 3.2.1 Anomalia de Temperatura

Na Figura 3.2 são mostradas as anomalias de temperatura média (°C) para os períodos 2011-2040 (a), 2041-2070 (b) e 2071-2100 (c), simuladas pelos modelos para os dois cenários RCP4.5 e RCP8.5. Para os três períodos, as simulações mostram o centro-oeste do Brasil com anomalias de temperatura maiores do que as demais regiões do país e, no período de 2011-2040, é possível identificar um acréscimo de temperatura de 2,5°C estimado pelo ETA/HadGEM2-ES (RCP8.5).

Comparando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para os dois modelos, as diferenças de temperatura são mais evidentes no terceiro período, de 2071-2100. Nesse período, ETA/HadGEM2-ES indica anomalias superiores a 6°C para o RCP 8.5 em todo o Brasil e para o cenário RCP4.5 indica em torno 4,5°C. Já o modelo ETA/MIROC5 na mesma situação, indica anomalias em torno de 4,5°C para o RCP 8.5 e em torno de 2°C para o RCP 4.5.

Dessa forma, o modelo ETA forçado pelo modelo global HadGEM2-ES simulou anomalias de temperatura superiores às simuladas quando forçado pelo modelo global MIROC5 nos três períodos. Os resultados gerados nos estudos setoriais com o ETA/HadGEM2-ES refletiram isso, tornando prognósticos deste modelo sempre mais críticos, em especial, para o cenário RCP 8.5 e para o período 2071-2100.

Figura 3.2 Anomalia de temperatura média (°C) para o ETA/MIROC5 e ETA/HadGEM2-ES (cenários RCP4.5 e RCP8.5, da esquerda para direita): (a) período 2010-2040 (b) período 2041-2070 e (c) período 2071-2099.

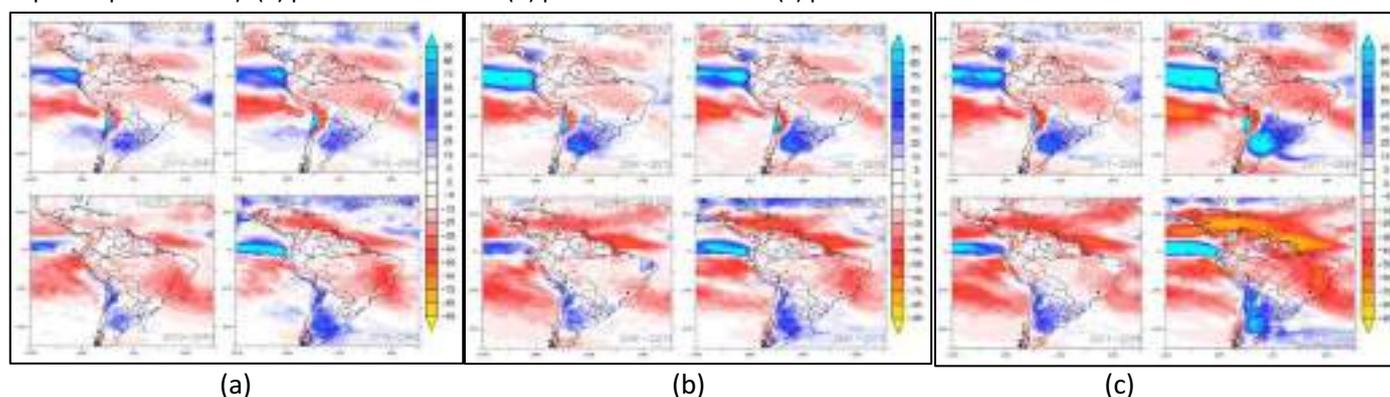


### 3.2.2 Anomalia de Precipitação

Na Figura 3.3 são mostradas as anomalias de precipitação média anual (%) para os períodos 2011-2040 (a), 2041-2070 (b) e 2071-2100, (c) simuladas pelos modelos para os cenários RCP4.5 e RCP 8.5. Para os três períodos, as simulações mostram o extremo sul do Brasil com anomalias positivas e as demais regiões do país com anomalias negativas.

As simulações do modelo ETA/HadGEM2-ES mostram, principalmente na região litorânea do Brasil, anomalias negativas de precipitações nos três períodos de 30 anos. No período de 2071-2100, as anomalias atingem valores inferiores a 50% em várias regiões para o cenário RCP8.5. Comparando os cenários RCP4.5 e RCP8.5, as simulações indicam que o RCP8.5 apresenta-se mais seco na maior parte do Brasil, principalmente no litoral das regiões Nordeste e Sudeste do país.

Figura 3.3 Anomalia de precipitação média anual (%) para o ETA/MIROC5 e ETA/HadGEM2-ES (cenários RCP4.5 e RCP8.5, da esquerda para direita): (a) período 2010-2040 (b) período 2041-2070 e (c) período 2071-2099.



### 3.3 Incertezas nos Prognósticos Climáticos

A viabilidade da obtenção de prognósticos climáticos através de simulações computacionais norteou a decisão de utilizar, no BRASIL 2040, apenas dois modelos climáticos globais (HadGEM2-ES e MIROC5), um modelo climático regional (ETA) e dois cenários de forçantes radiativas (RCP4.5 e RCP8.5, ver Figura 1.4 do Capítulo *Bases Conceituais*). É importante localizar o leitor no contexto das incertezas decorrentes dessa decisão, particularmente sobre as estimativas e magnitudes dos impactos setoriais. Por um lado, a opção de adotar dois cenários de forçantes radiativas e não quatro não cobre o leque de cenários possíveis e, portanto, de opções para realização de prognósticos. Por outro, como já foi dito no Capítulo *Bases Conceituais*, a utilização de técnicas de *downscaling* para

redução da escala da grade podem amplificar erros climáticos de larga escala nos modelos climáticos globais devido a sua maior resolução espacial.

Com o objetivo de checar essas condições e possíveis amplificações dos resultados do *downscaling*, a SAE-PR conduziu um estudo específico, limitado a uma variável de impacto, a Energia Natural Afluyente - ENA (ver capítulos *Recursos Hídricos e Energia*). Foram realizados dois níveis de checagem: primeiro, foram utilizados treze modelos climáticos globais com a finalidade de mostrar a variabilidade dos resultados da ENA em se considerando um conjunto maior de modelos. Depois, a ENA foi calculada a partir dos dois modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5, mas sem o uso do modelo regional ETA, ou seja, utilizando o *downscaling* estatístico simples, para mostrar a influência do uso do modelo regional enquanto método de *downscaling*. Esses experimentos mantiveram sem alteração todas as outras variáveis e processos fontes de incertezas, de modo que apenas o componente climático pudesse ser analisado.

### 3.3.1 Variabilidade da ENA entre Modelos Globais

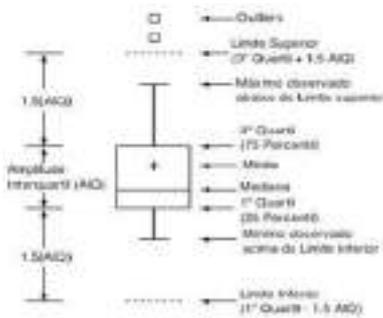
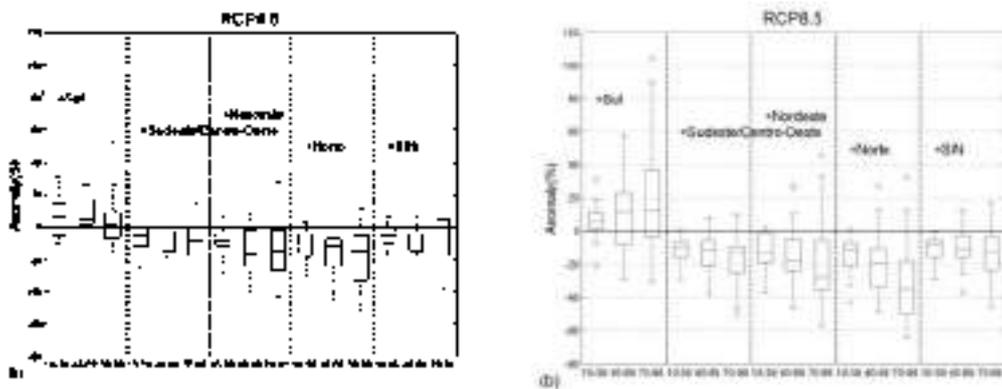
Dentre os modelos globais de diferentes centros climáticos do mundo, foram identificados quais deles melhor representam o clima atual para as diversas regiões do Brasil de modo que apenas esses fossem usados para representar o clima futuro. A avaliação foi constituída por etapas que analisaram os padrões de variação do clima em diferentes escalas temporais: sazonal, interanual e interdecadal. Com essa avaliação, treze modelos globais mostraram melhor desempenho em representar o clima no país, dentre os quais o MIROC5 e o HadGEM2-ES. São eles: bcc-csm1-1 e BNU-ESM (China), CanESM2 (Canadá), CESM1-BGC e GFDL-ESM2M (EUA), CSIRO-Mk3-6-0 (Austrália), HadGEM2-AO, HadGEM2-CC e HadGEM2-ES (Reino Unido), IPSL-CM5A-LR e IPSL-CM5A-MR (França), MIROC5 e MIROC-ESM (Japão).

Os resultados foram avaliados através de gráficos do tipo *box-plot*. A Figura 3.4 apresenta os resultados para três períodos no futuro (2010-2039, 2040-2069 e 2070-2098), para os dois cenários de forçantes radiativas (RCP4.5 e RCP8.5) e para os subsistemas do Sistema Integrado Nacional – SIN (Sul, Sudeste-Centro-Oeste, Nordeste, Norte e total). Percebe-se que:

- Quanto mais adiante no futuro, as amplitudes dos diagramas *box-plot* são maiores, indicando que os treze modelos apresentam resultados mais discordantes, ou seja, o prognóstico torna-se mais incerto.
- Para o cenário RCP8.5 os prognósticos também são mais discordantes, entre os modelos, que para o cenário RCP4.5.
- Para quase todos os subsistemas, períodos no futuro e cenários de forçantes radiativas, há modelos que simularam aumento e modelos que simularam redução da ENA.

Na Figura 3.5 estão as estimativas da ENA, calculadas a partir do modelo regional ETA aninhado nos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5, utilizadas no estudo setorial *Energia*. A comparação entre essas estimativas, usando dois modelos globais, e aquelas da Figura 3.4, resultado de treze modelos globais, mostra o posicionamento dos dois modelos selecionados para o BRASIL 2040 dentre os demais: apresentam a mesma tendência da maioria, apesar das diferenças de magnitude das estimativas.

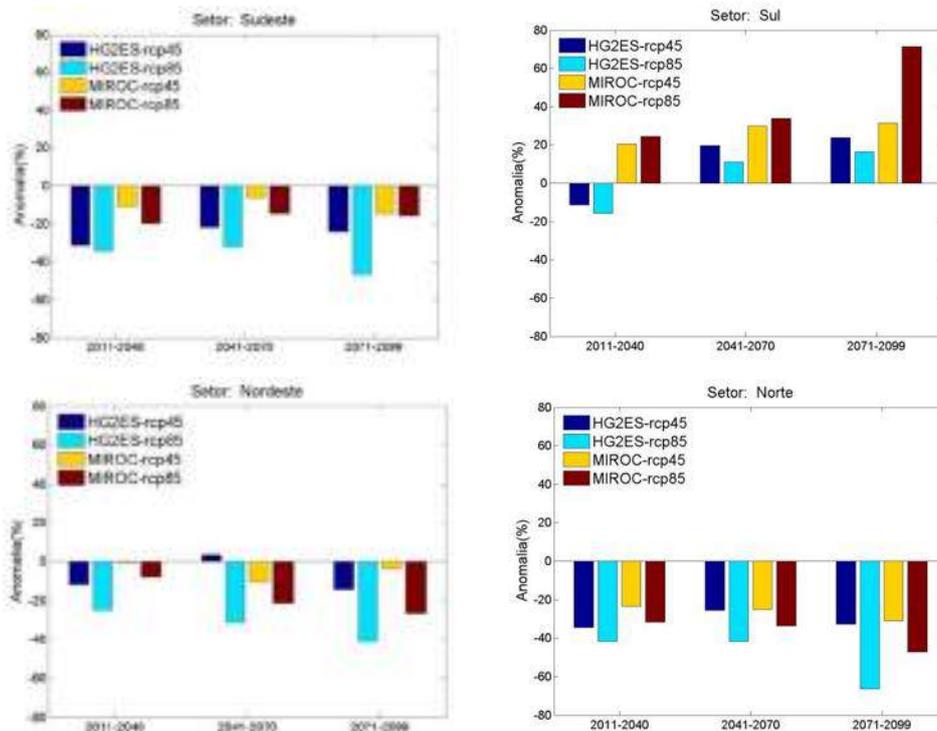
Figura 3.4 Anomalia da ENA anual para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para os subsistemas do SIN



### Gráficos Box-Plot

Esse tipo gráfico apresenta a distribuição dos resultados dos modelos através de medidas de dispersão, descritas pela amplitude e amplitude interquartil (IQR, representada pelo comprimento da caixa), a mediana, e os quartis (inferior e superior). A mediana dos resultados está entre os quartis, representada pela linha horizontal que divide a caixa. Nos resultados, cada caixa apresenta a dispersão dos modelos para uma bacia específica, a amplitude interquartil é representada pela altura da caixa e significa que 50% das anomalias dos modelos estão entre os quartis inferior e superior. É possível também identificar os outliers, representados por cruces no gráfico. Nesse caso, os outliers são os modelos cujas anomalias ficaram além dos limites inferiores ou superiores do box-plot, ou seja, são modelos cujas anomalias tem valores abaixo ou acima em 1.5 vezes a amplitude interquartil.

Figura 3.5 Anomalia da ENA anual usando as projeções do modelo ETA aninhado nos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5 para os subsistemas do SIN



## 3.3.2 Comparação ENA entre Modelo Regional ETA e downscaling estatístico

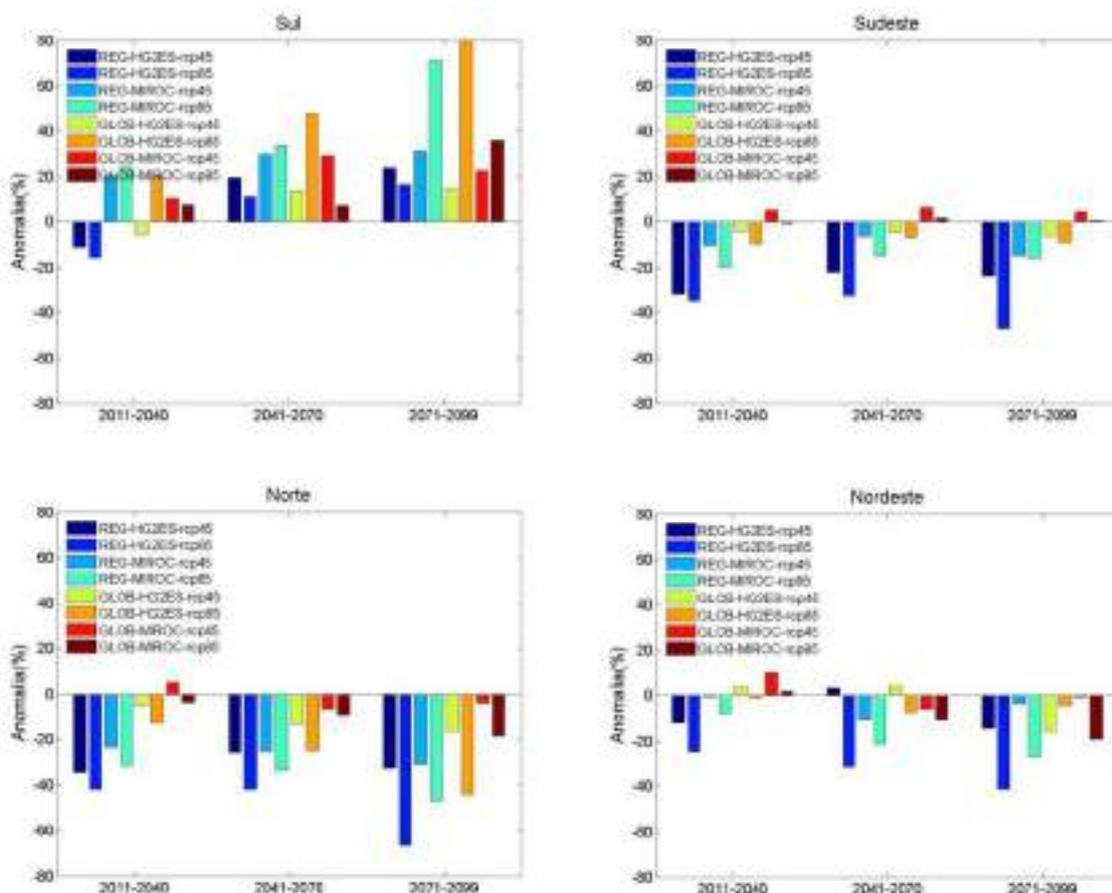
As anomalias de precipitações simuladas pelo modelo ETA mostraram que o Brasil pode sofrer uma escassez de chuvas no período de 2011-2100. Entretanto, é importante destacar que, ao se comparar as anomalias simuladas pelos dois modelos globais, HadGEM2-ES e MIROC5, com e sem uso do modelo regional ETA para aumento da resolução das projeções, ficou evidente que o ETA tende a amplificar o sinal mais seco em praticamente todo o Brasil e tornar bem mais úmido o extremo sul do país.

O modelo ETA forçado pelo modelo global HadGEM2-ES, apresenta uma anomalia de -20% de precipitação na região Sudeste do Brasil que a simulação do mesmo modelo global, sem a utilização do ETA, nos períodos de 2010-2040 e 2041-2070. Esse comportamento também é evidenciado nas simulações com o modelo MIROC5, principalmente no período de 2071-2099.

A intensificação das anomalias negativas de precipitação, mostradas pelo modelo regional ETA, pode estar associada ao aumento da variabilidade temporal das séries anuais em relação aos modelos globais. Além disso, há uma clara intensificação dos eventos de temperaturas e precipitações mínimas. Esse comportamento também é repetido no Norte do país. No Sul, o modelo regional intensifica o sinal das máximas anuais em relação ao modelo global.

As estimativas da ENA<sup>2</sup> refletem a tendência de amplificação do sinal da precipitação pelo modelo ETA, conforme pode ser observado na Figura 3.6.

Figura 3.6 Comparação entre as estimativas da ENA pelos modelos globais e com e sem o modelo regional ETA



<sup>2</sup> A ENA é calculada com a partir dos dados de vazão, os quais são estimados pelas precipitações simuladas pelos modelos atmosféricos (mais informações ver Capítulo de Recursos Hídricos e Energia).

## 4. RECURSOS HÍDRICOS

As mudanças climáticas podem produzir grandes impactos sobre os recursos hídricos, particularmente por meio de modificações nos padrões de precipitação e temperatura. Podem impactar diretamente a umidade do solo, a reserva subterrânea, a evaporação, a evapotranspiração e a geração do escoamento superficial. Essas modificações, associadas ao aumento da demanda por água projetada para as próximas décadas, principalmente devido ao crescimento populacional e ao desenvolvimento econômico, poderão exercer grande pressão nos hidrossistemas brasileiros.

A matriz energética brasileira é basicamente constituída por energias consideradas limpas, principalmente provenientes de hidroelétricas. A hegemonia da hidroeletricidade na matriz de energia elétrica brasileira impõe cautelosa análise sobre o regime fluvial e seus padrões de variação temporal, tendo em vista o significativo impacto que essas variações podem produzir na oferta de energia e, conseqüentemente, em toda a economia nacional. Diante disso, existe uma demanda, do Estado e de empresas privadas, por informações climáticas para a tomada de decisão, no médio e longo prazo, no nível regional/local. Informações de variabilidade e mudanças climáticas de qualidade podem tornar o planejamento energético mais eficaz e minimizar os potenciais impactos sobre a disponibilidade deste recurso.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN – ver Box 1). A obtenção das vazões naturais, a previsão de vazões e a geração de cenários de aflúncias de vazão seguem o que estabelece o ONS para a elaboração do Programa Mensal da Operação Energética (PMO – ver Box 2).

### 4.1 Etapas do Estudo

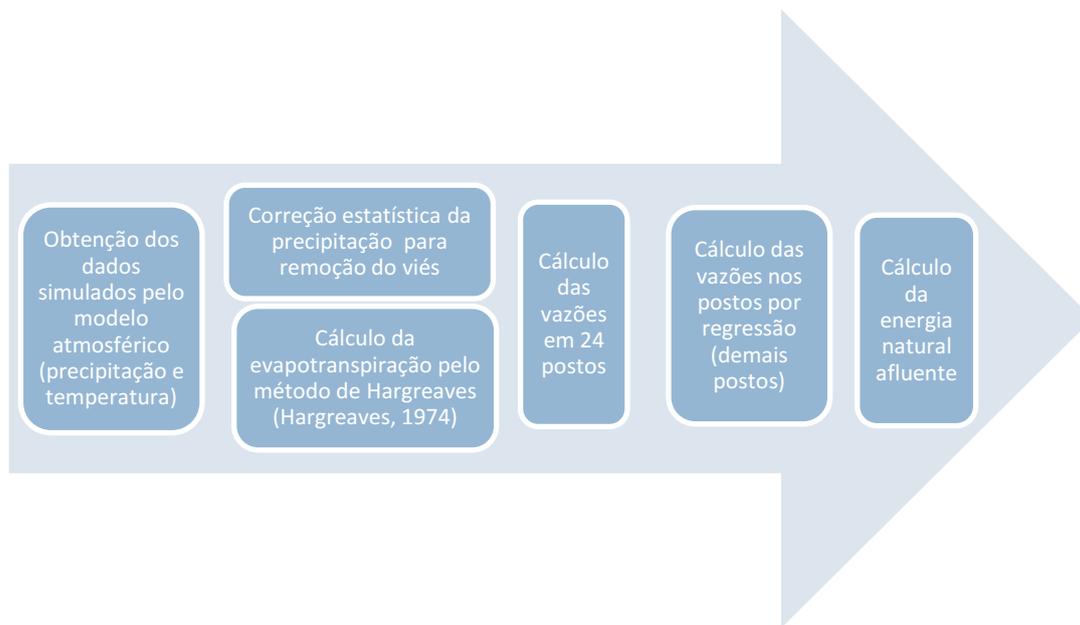
A avaliação e quantificação da sensibilidade da oferta hídrica à variabilidade e à mudança climática foram feitas em etapas conforme a Figura 4.1. Os modelos utilizados foram o regional ETA com condições iniciais e de contorno dos modelos globais MIROC5 e HadGEM2-ES (que serão indicados como ETA/MIROC5 e ETA/ HadGEM2-ES), para os cenários RCP 4.5 e 8.5. Para o cálculo das vazões são necessários dados de precipitação e de evapotranspiração (calculada em função da temperatura). Devido aos erros sistemáticos dos modelos em simular a precipitação (viés) foi feita uma correção estatística da mesma antes do cálculo das vazões. Este é um procedimento usual em um acoplamento de modelos como o aqui realizado, pois atenua a incerteza relativa aos erros do modelo atmosférico.

Box 1: O Sistema Interligado Nacional (SIN) responde pela produção e transmissão de energia elétrica do Brasil. É um sistema hidrotérmico de grande porte com predominância de usinas hidroelétricas, do qual apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país encontram-se fora, em pequenos sistemas isolados, localizados principalmente na região amazônica (ONS, 2011).

Box 2: Em razão das metodologias e critérios atualmente adotados na previsão de vazões, não existem dados de vazões observadas mensais para alguns locais de aproveitamentos em operação. Para tanto, adota-se, em geral, a realização de previsão de vazões para um subconjunto de aproveitamentos de cada bacia, denominados de Postos Base (onde se tem os dados). No restante dos locais de aproveitamento, as vazões são previstas através de regressões lineares mensais a partir dos dados dos Postos Bases para complementar as previsões de vazões para todo o SIN (ONS, 2011).

# RECURSOS HÍDRICOS

Figura 4.1 Etapas para avaliação e quantificação da sensibilidade da oferta hídrica à variabilidade e à mudança climática.

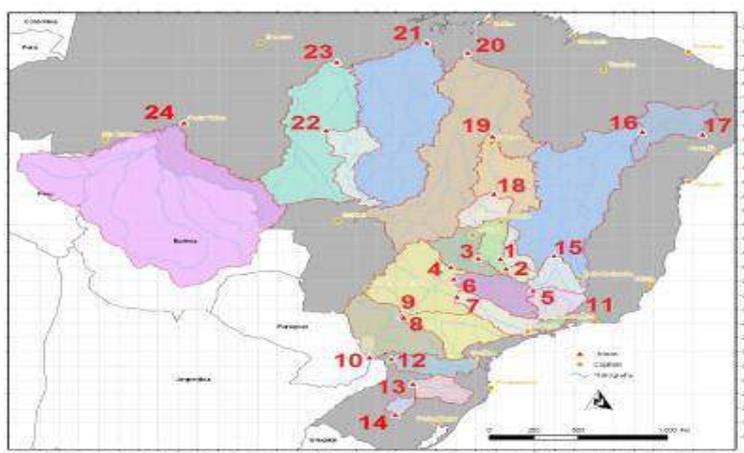


As vazões foram calculadas com o modelo hidrológico Soil Moisture Accounting Procedure – SMAP, que transformou chuva em vazão, para 24 bacias (Figura 4.2) do país. Para as demais bacias, as vazões foram determinadas a partir de regressões lineares mensais. A partir das vazões incrementais mensais de cada aproveitamento hidroelétrico estimam-se as Energias Naturais Afluentes - ENA. A ENA é obtida multiplicando-se a vazão natural de cada posto pela produtividade de cada subsistema (em  $\text{MWmed}/\text{m}^3/\text{s}$ ).

O SIN engloba grande diversidade de regiões, com bacias que possuem comportamentos sazonais distintos. A fim de se aproveitar ao máximo os recursos energéticos existentes no País e a sazonalidade hidrológica própria de cada região, o sistema é dividido em quatro subsistemas: Região Sudeste/Centro-Oeste, Região Sul, Região Norte e Região Nordeste. Esses subsistemas são interligados por uma extensa malha de transmissão, que possibilita a transferência de excedentes energéticos e permite a otimização dos estoques armazenados nos reservatórios das usinas hidroelétricas.

Existe uma complementaridade hidrológica entre as Regiões Sudeste/Centro-Oeste e Sul. A distribuição das ENAs médias mensais indica que os respectivos períodos secos e úmidos não são coincidentes nessas regiões. A natureza do SIN faz com que exista um acoplamento espacial e temporal das decisões tomadas na sua operação energética.

Figura 4.2 Bacias de alguns postos base do setor elétrico que foram usadas no modelo hidrológico SMAP



Todas as etapas foram executadas para o clima atual (1961-2000) e para os três períodos futuros: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099. Os impactos nas vazões e ENAs são calculadas em relação ao clima atual simulado pelo modelo, expressas pela anomalia, ou seja, a diferença percentual entre a variável (vazão ou ENA) no cenário futuro e no cenário atual.

## 4.2 Vazões

O impacto na média anual das vazões no século XXI para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação ao século XX (1961 a 2000), para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099 pode ser visualizado na Figura 4.3. Para as bacias dos setores Norte e Sudeste/Centro-Oeste, os modelos sugerem uma maior possibilidade de reduções nas vazões, divergindo apenas em magnitude. Entretanto, no setor Sul os modelos divergem: o modelo ETA/MIROC5 projeta aumento nas vazões de várias bacias, enquanto o modelo ETA/HadGEM2-ES mostra vazões abaixo da média histórica em até 40%, em algumas bacias, nos três períodos.

No setor Nordeste, os modelos indicam bastante incerteza na bacia do Xingó. Nessa bacia, o ETA/HadGEM2-ES-RCP4.5 mostra 40% de aumento, enquanto o ETA/HadGEM2-ES-RCP8.5 mostra redução superior a 70%, entre 2041 e 2070. Essa bacia mostra grande dependência entre os cenários, sugerindo grande vulnerabilidade ao clima. Enquanto o cenário RCP4.5 mostra anomalias menores de vazões na bacia para ambos os modelos globais no período 2041-2070, o cenário RCP8.5 mostra anomalias de vazões negativas superiores em módulo a 30%.

As anomalias de vazões para o século XXI, calculadas com base nas regressões pelo modelo ETA/HadGEM2-ES, mostram reduções em praticamente todos os postos do SIN para os três períodos de 30 anos, enquanto o modelo MIROC5 mostra aumento em alguns postos das regiões Sudeste e Sul e reduções na região Norte. A distribuição espacial destes comportamentos para o período 2011-2040, nos dois cenários, é apresentada na Figura 4.4.

Podem ser observados os seguintes aspectos quanto às vazões:

- (a) o modelo ETA forçado com HadGEM2-ES apresenta cenários mais pessimistas do que o MIROC5;
- (b) o cenário RCP8.5 intensifica as anomalias de vazões em comparação ao RCP4.5, principalmente no extremo Sul do país e Nordeste;
- (c) os modelos apresentam em comum uma pronunciada tendência positiva no extremo Sul do país associada com reduções na maioria dos aproveitamentos do Centro-Oeste, Norte e Nordeste;
- (d) na região Norte do país, os modelos indicam que as vazões devem diminuir a uma taxa superior a 5% em cada período de 30 anos;
- (e) na região Sudeste, os modelos indicam margens que sugerem uma maior possibilidade de reduções nas vazões ou leve aumento, enquanto que nas regiões Centro-Oeste e Nordeste as vazões podem diminuir bastante, principalmente se as projeções do cenário RCP8.5 forem confirmadas (anomalias de 50% abaixo da média histórica no período de 2071-2099).

Figura 4.3 Anomalia de vazões médias anuais para os períodos 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099 para o modelo Eta/MIROC5 e Eta/HadGEM2-ES para os cenários RCPs 4.5 e 8.5

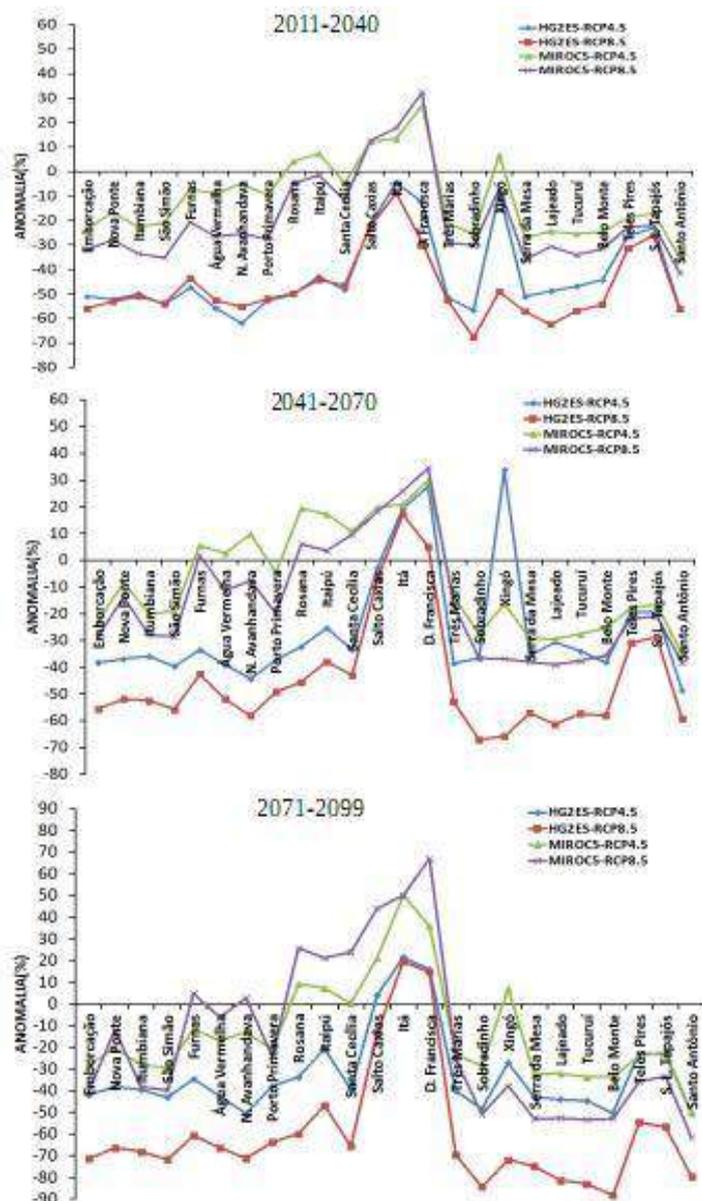
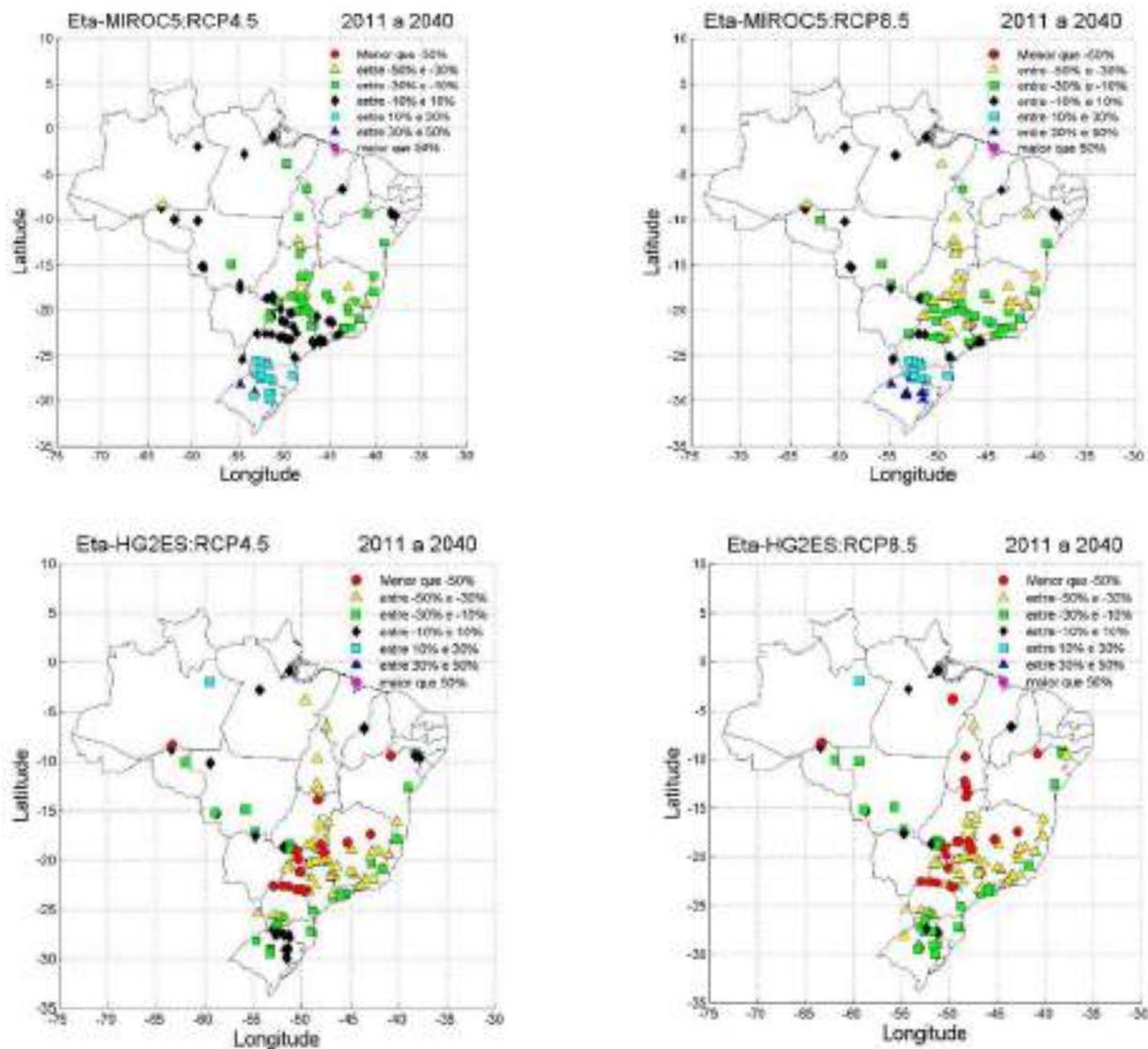


Figura 4.4 Anomalia de vazões médias anuais (%) para o período 2011-2040, nos modelos ETA/MIROC5 e ETA/HadGEM2-ES, para os cenários RCPs 4.5 e 8.5.



### 4.3 Energia Natural Afluente – ENA

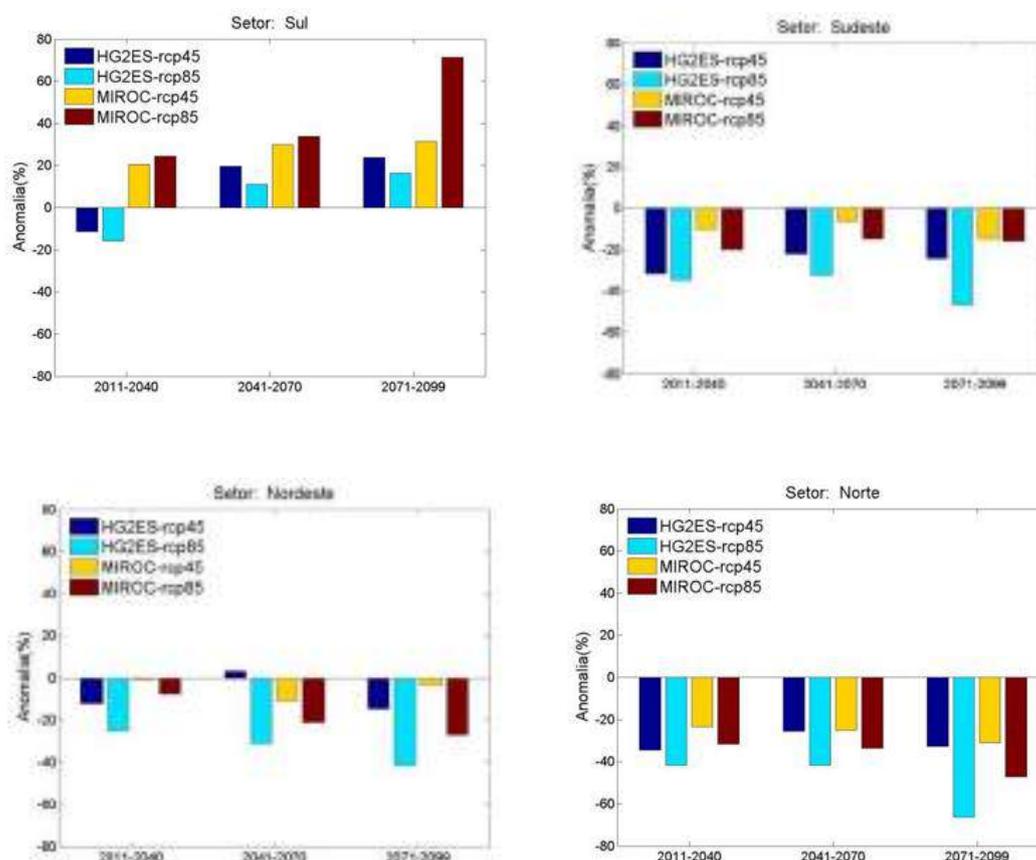
Os modelos indicam anomalias negativas na ENA anual média do SIN para os períodos 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099, para a maior parte dos setores, conforme Figura 4.5. A anomalia negativa é mais intensa para o cenário RCP8.5, considerando ambos os modelos ETA/MIROC5 e ETA/HadGEM2-ES. Além disso, o modelo ETA/HadGEM2-ES indica reduções da ENA superiores a 10%, em qualquer cenário, em cada período de 30 anos. Essa anomalia na ENA não é distribuída uniformemente em cada subsistema.

Os modelos mostram anomalia negativa na ENA anual dos setores Norte, Nordeste e Sudeste nos três períodos e para os dois cenários, enquanto, para o subsistema Sul, o modelo MIROC, para ambos os cenários, mostra aumento nos três períodos, chegando a uma anomalia superior a 60% no período 2071-2099. As simulações sugerem redução em praticamente todas as bacias do setor Sudeste e Nordeste, nos três períodos analisados (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099). Porém, destaca-se que, no subsistema Sudeste, na bacia do Paraguai, todas as simulações indicam sensível aumento na ENA.

## 4.4 As incertezas nos prognósticos de Recursos Hídricos

A metodologia adotada para avaliar os impactos da mudança climática nas vazões e nas ENAs constitui-se em um acoplamento entre modelos. Na modelagem atmosférica, as principais incertezas estão relacionadas ao processo de *downscaling* e aos cenários de emissão. Na modelagem hidrológica e no cálculo da ENA, as incertezas estão relacionadas aos parâmetros e estrutura desses modelos (incluindo o de regressão). A análise das vazões e das ENAs em termos de anomalias (diferença entre vazão/ENA calculada para os climas atual e futuro) permite atenuar a influência da modelagem hidrológica e das regressões na cascata de modelos. Dessa forma, a avaliação dos impactos das mudanças climáticas pode-se concentrar mais na influência do clima sobre as vazões. As maiores incertezas identificadas nas vazões e nas ENAs são relacionadas ao viés dos modelos atmosféricos (HadGEM2-ES, por exemplo, tem viés mais seco que o MIROC5), aos cenários em si (RCPs) e no horizonte de tempo da simulação. O período 2071-2099 aumenta ainda mais as diferenças das variáveis calculadas e os resultados devem ser usados com cautela.

Figura 4.5 Anomalia da ENA anual usando as projeções do modelo Eta para os subsistemas do setor elétrico brasileiro.



## 4.5 Medidas de Adaptação em Recursos Hídricos

O impacto das mudanças climáticas sobre as vazões indica uma tendência de aumento na região Sul do país, ao passo que nas regiões Norte e Nordeste verifica-se uma redução nessa variável. Especificamente, há possibilidades de aumento de frequência dos eventos de cheia e inundações na região Sul e de eventos de seca nas regiões Norte-Nordeste. A redução da disponibilidade hídrica nas regiões Norte e Nordeste deve evidenciar o acirramento de conflitos entre usos múltiplos, a desaceleração da economia devido à redução da disponibilidade hídrica para a agricultura e indústria, bem como o desabastecimento de cidades.

# RECURSOS HÍDRICOS

De modo geral, as informações apresentadas evidenciam riscos que demandam ações preventivas e de mitigação, no âmbito de uma lógica proativa, com vistas à redução das vulnerabilidades dos sistemas e das populações. As medidas a serem tomadas não podem ter um cunho reativo, ou seja, um planejamento de curto prazo apenas para administrar as “urgências”. Deve-se romper com a inércia e as medidas devem sinalizar ações de gestão da oferta e da demanda, fiscalização de usos e participação dos agentes sociais que possuem usos conflitantes, frente a uma realidade marcada pela incerteza e complexidade. Diante disso, foram elencadas medidas institucionais e operacionais, que devem ser integradas, na medida em que ações isoladas são ineficazes para lidar com os desafios postos por um mundo marcado pelo processo de aceleração das mudanças climáticas as quais revelam riscos que extrapolam as fronteiras físicas e políticas e aportam severamente em diversas realidades locais.

Assim, para lidar com um ambiente de crescente incerteza, sugere-se a adoção de algumas diretrizes gerais: (i) a água como uma política pública, promovendo a justiça e equidade social; (ii) análise e compreensão das vulnerabilidades do sistema, com vistas ao aumento da sua resiliência<sup>3</sup>, (iii) flexibilidade e capacidade de adaptação; (iv) melhoria e incremento dos instrumentos de gestão; (v) gestão de oferta e demanda; (vi) gestão de conflitos; (vii) incorporação de informações climáticas como subsídio para a tomada de decisão e (viii) gestão de risco, pautada nas ideias de incerteza/adaptação/risco de falha, tendo como par dialético a segurança hídrica.

Essas diretrizes conduzem à definição de um conjunto integrado de medidas de adaptação, a saber:

- ✓ Desenvolvimento e implantação de sistema de alerta precoce;
- ✓ Adaptação da drenagem urbana com vista a evitar problemas relativos a inundações;
- ✓ Ajuste da matriz energética frente à possibilidade de redução hídrica nas regiões Norte e Nordeste;
- ✓ Elaboração e implantação de programas de conservação energética;
- ✓ Aumento do aproveitamento e investimento em hidroeletricidade;
- ✓ Aumento da capacidade de armazenamento de água por meio do transporte da água no tempo e espaço por meio da transposição de bacias;
- ✓ Elaboração de planos de contingência específicos para eventos de cheias, os quais deverão estar associados a um planejamento de longo prazo, devendo ser frequentemente atualizados para que sejam orientadores das ações durante a ocorrência desse o extremo climático;
- ✓ Elaboração de planos de gestão de secas, com foco nas bacias hidrográficas, os quais devem passar por processos de atualização, a fim de que sejam instrumentos eficientes e aderentes à realidade;
- ✓ Elaboração de planos de gestão de secas para cidades, os quais devem ser atualizados, a fim de que as ações propostas possam ser revisitadas e adequadas para cada situação e/ou estágio de seca;
- ✓ Identificação de novos mananciais, para que possam ser utilizados em situação de escassez hídrica;
- ✓ Promoção de intercâmbio institucional entre órgãos que lidam com a administração dos recursos hídricos, como mecanismo de atualização do conhecimento sobre mudança e variabilidade climática;
- ✓ Realização de avaliações dos processos físicos nos reservatórios do sistema, como forma de promover o aprimoramento do conhecimento da natureza para prever mudanças;
- ✓ Aprimoramento dos modelos de previsão climática, com o intuito de aperfeiçoar seu acoplamento aos modelos hidrológicos, possibilitando a avaliação dos impactos na agricultura, economia, recursos hídricos e no setor elétrico;
- ✓ Promoção da gestão de riscos, através da construção de cenários futuros para o planejamento de longo prazo;
- ✓ Implantação de programa de difusão tecnológica para alcance do uso racional da água;
- ✓ Desenvolvimento de estudos de impactos da mudança climática com base em modelos globais, uma vez que os modelos regionais possuem um viés que intensifica o sinal das anomalias.

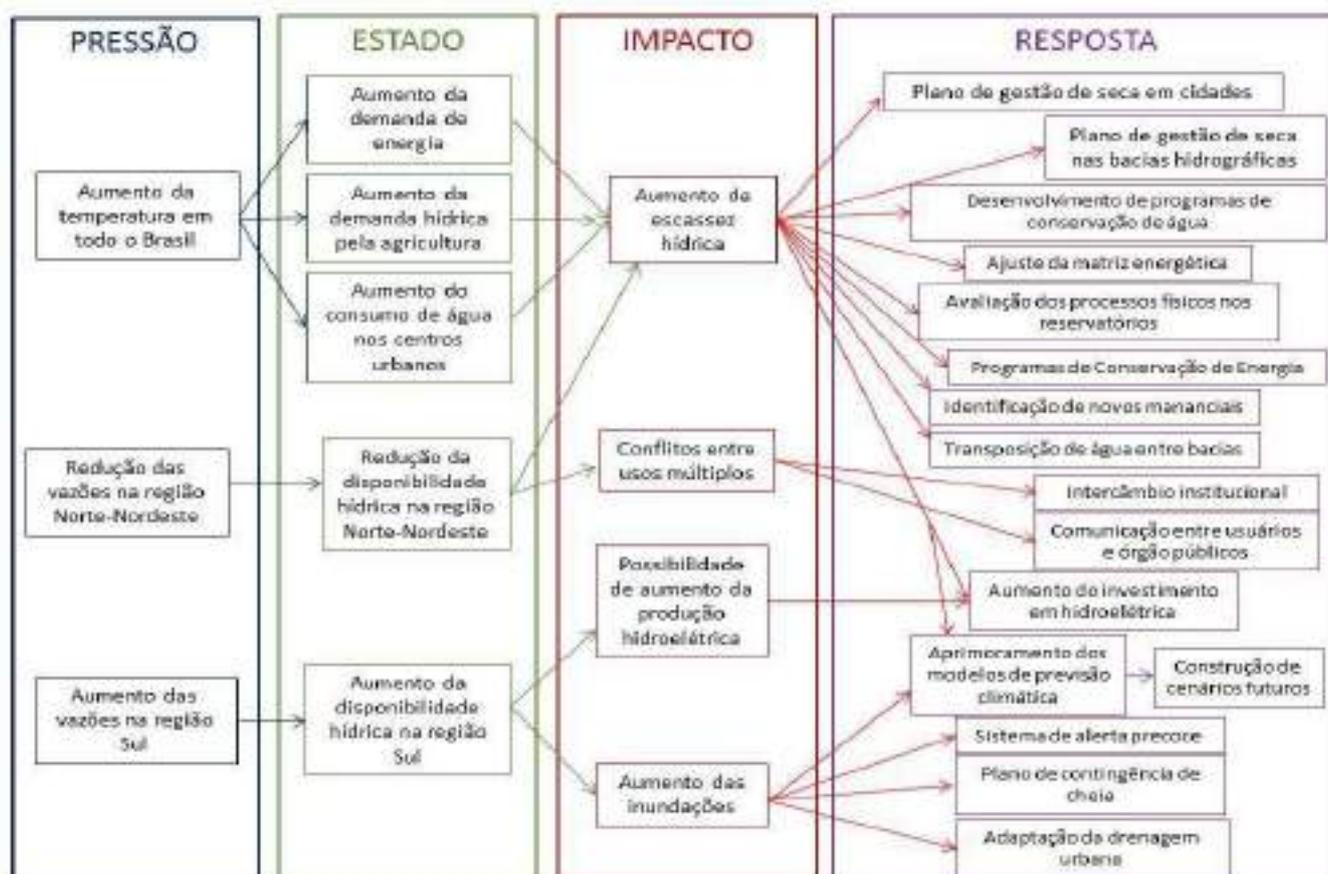
<sup>3</sup> A resiliência está ligada à ideia de que os sistemas ecológicos operam próximo ao equilíbrio global, configurando-se com a capacidade de voltar a um estado de equilíbrio após uma perturbação, sendo quantificada em termos de tempo de retorno. Considerar a resiliência no processo de gestão dos recursos hídricos aumenta a capacidade do sistema sócio-natural de sustentar-se frente à imprevisibilidade, aos riscos e à complexidade.

# RECURSOS HÍDRICOS

As medidas apresentadas nesse item foram pensadas por meio da adaptação feita à metodologia Pressão-Estado-Impacto-Resposta (PEIR) desenvolvida pelo PNUMA (2007). Essa metodologia possibilita identificar os elementos que pressionam um determinado setor, ocasionando modificações em seu estado, revelando impactos específicos que demandam respostas para cada situação. A aplicação dessa metodologia pode ser visualizada na Figura 4.6 e as respostas elencadas refletem exatamente as medidas de adaptação mencionadas.

A efetivação das estratégias de adaptação pauta-se numa governança dotada de instrumentos eficientes de gestão, legitimada por uma participação social que deve ter canais de interlocução com o poder público. Essas estratégias se concretizam em três dimensões integradas da gestão: gestão da oferta, gestão da demanda e gestão dos conflitos. Atuar apenas em uma dessas dimensões impossibilita a efetiva gestão dos recursos hídricos. Assim, a articulação dessas três dimensões permite uma gestão que possibilita a redução da vulnerabilidade dos sistemas hídricos frente às variabilidades e mudanças climáticas, contribuindo para o aumento da sua resiliência.

Figura 4.6 Fluxograma dos impactos das mudanças climáticas no setor de recursos hídricos utilizando a metodologia PEIR.



Fonte: Elaboração própria

## Referências

PNUMA. Projeto **Geo Cidades: Relatório ambiental urbano integrado**. Rio de Janeiro: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente/MMA/IBAM/ISER/REDEH. 2007.

ONS - Atualização de Séries Históricas de Vazões – 1931 a 2010. Operador Nacional do Sistema – ONS. Brasília. 36p, 2011.

## 5. INFRAESTRUTURA URBANA

### 5.1 Objetivos do Estudo

Este estudo tem como objetivo avaliar prováveis impactos da mudança climática sobre a infraestrutura de drenagem urbana brasileira, considerando um horizonte de 30 anos (2010 – 2040) e apontar estratégias de adaptação que considerem critérios sociais, econômicos e ambientais para os municípios em que a análise foi viabilizada.

Após uma discussão dos resultados, é apresentada uma análise sucinta das incertezas e limitações inerentes ao estudo, as quais reforçam a necessidade de uma reflexão sobre a utilização destes resultados para planejamento e gestão.

### 5.2 Metodologia

A metodologia utilizada pode ser estruturada basicamente em três etapas (Quadro 5.1):

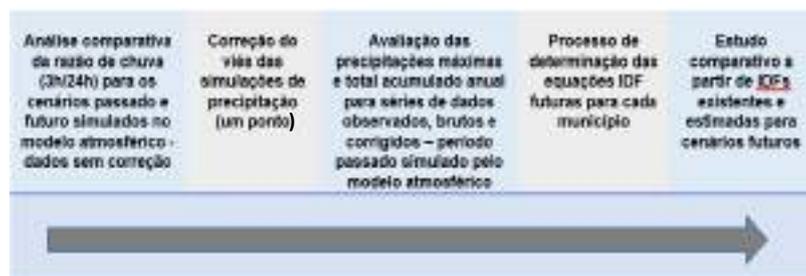
Quadro 5.1. Síntese da metodologia utilizada

1	2	3
Correção do viés <sup>5</sup> das previsões de precipitação e elaboração de equações <i>idf</i> <sup>6</sup> (intensidade-duração-frequência) para o clima futuro	Modelagem hidrológica das microbacias urbanas (sistemas de macrodrenagem) e elaboração de cenários futuros	Identificação de mecanismos de adaptação aos impactos apresentados nos cenários e levantamento das fragilidades das respostas institucionais

#### 5.2.1. Correção do viés das previsões de precipitação e elaboração das curvas IDF

O percurso metodológico para a correção do viés de precipitação e elaboração das curvas IDF é apresentado no Quadro 5.2.

Quadro 5.2. Percurso Metodológico comum aos 5 municípios selecionados (Recife, Fortaleza, São Paulo, Salvador e Rio de Janeiro)



### Premissas Metodológicas

- Considera-se, neste estudo, a vulnerabilidade apenas das infraestruturas de **drenagem urbana** frente às mudanças climáticas e, para estas, são propostas medidas de adaptação aos impactos;
- **Não foram analisados** os componentes da **microdrenagem**, como sarjetas, bocas-de-lobo ou galerias, mas sim os sistemas de macrodrenagem, especificamente os canais, excluídas as bacias de detenção;
- Para a determinação do escoamento superficial utiliza-se o Método Curva-Número (CN)<sup>4</sup>, que é recomendado para bacias com áreas superiores a 2 km<sup>2</sup> e aplicável, principalmente, quando não há alta disponibilidade de dados;
- Foram escolhidas algumas bacias críticas, de acordo com o Plano Nacional de Gestão de Riscos e Respostas a Desastres Naturais 2012-2014, e, dentre as localidades constantes neste plano, foram selecionadas as regiões metropolitanas de **São Paulo, Rio de Janeiro, Fortaleza, Salvador e Recife** para prospecção inicial e análise, diante da disponibilidade de dados;
- A calibração e validação do modelo hidrológico só foi realizada quando havia dados de vazão em série histórica disponível. Para as localidades onde não foi possível a obtenção desses dados, foram verificadas as vazões resultantes, a partir da verificação do incremento de vazão decorrente de possíveis mudanças climáticas observadas nas previsões de precipitação;
- A categorização da situação atual das infraestruturas de drenagem urbana foi desenvolvida a partir do mapeamento de uso e ocupação do solo das localidades, quando existentes e disponíveis, e das respectivas infraestruturas, objeto de análise deste estudo. A caracterização futura foi constituída a partir das projeções de crescimento associadas aos Planos Diretores dos municípios envolvidos e de Saneamento básico, quando existentes.

<sup>4</sup> O método CN (Curva-Número) foi desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, através do *Soil Conservation Service* atualmente *National Resource Conservation Service (NRCS)*.

<sup>5</sup> As simulações dos modelos climáticos apresentam, com frequência, um viés decorrente de erros sistemáticos. Assim, foram desenvolvidos alguns métodos para reduzir o viés das simulações dos Modelos Climáticos Regionais (MCRs) (Teutschbein e Seibert, 2012; Piani *et al.*, 2010; Themebl *et al.*, 2011).

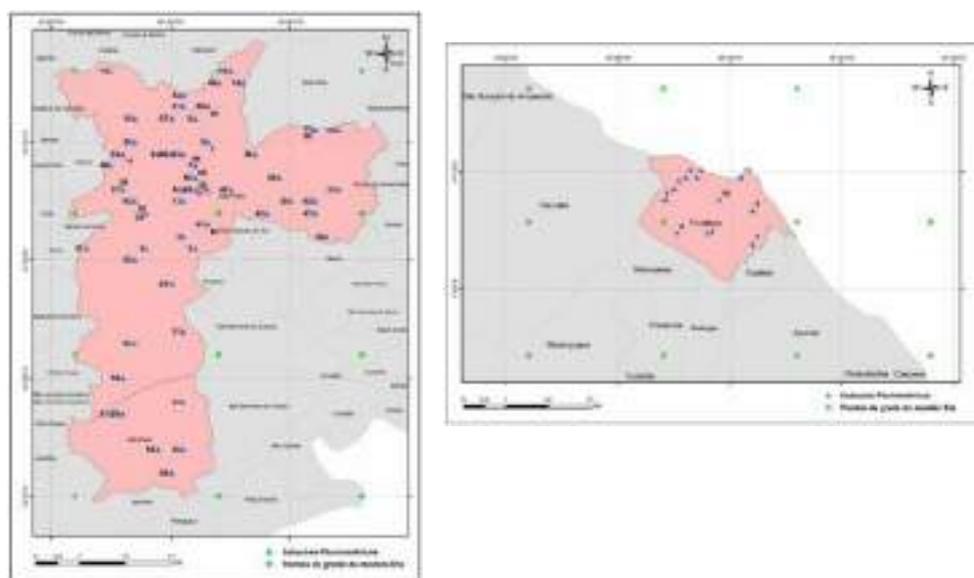
<sup>6</sup> Essas equações são utilizadas no dimensionamento do sistema de drenagem, fornecendo aos modelos hidrológicos as informações sobre as precipitações críticas (intensidades), as quais são transformadas em escoamento superficial e, portanto, podem aportar informações para o desenvolvimento de uma série de parâmetros de adaptação futura dos sistemas de drenagem.

# INFRAESTRUTURA URBANA

É importante ressaltar que a melhor resolução temporal de dados de precipitação fornecidos pelo modelo em estudo é de 3 horas. Essa resolução ainda é muito baixa para o estudo de precipitações intensas que, em geral, duram poucos minutos. As precipitações de curtíssima duração são as que apresentam as maiores intensidades e, em geral, são as que provocam uma quantidade maior de eventos de alagamento e inundação urbana.

As estações pré-selecionadas, bem como os pontos de grade do modelo regional, com resolução espacial de 20 km, selecionados por estarem contidos ou próximos ao município, podem ser vistos na Figura 5.1 para os municípios de São Paulo e Fortaleza.

Figura 5.1. Localização das estações pluviométricas encontradas para os municípios de São Paulo e Fortaleza e dos pontos de grade do modelo atmosférico.



Porém, apenas **uma estação pluviométrica e um ponto de grade** do MCR, **por município**, foram utilizados para a aplicação do método. Elegeu-se a estação e o ponto de grade do MCR considerando critérios como extensão do período de observação, proximidade a áreas críticas de alagamentos observadas, maior proximidade possível entre o ponto de grade do modelo e a estação, dentre outros.

A análise das correções de viés foi feita também com base nas curvas de densidade acumuladas (cda) para os dados observados, brutos e corrigidos para o período passado. A partir dos dados corrigidos de precipitação, foram estabelecidas relações IDF's para os cenários climáticos RCP 4.5 e 8.5, executados nos modelos ETA/HadGem2-ES e ETA/MIROC5. Os resultados encontrados foram comparados com as IDF's existentes para os Municípios de **Recife, Salvador, Fortaleza, Rio de Janeiro e São Paulo**.

As IDF's são equações que relacionam intensidade (i), duração (d) e frequência (f) de precipitações intensas para uma dada localidade. Outra forma de se apresentar a frequência de uma precipitação intensa é o Período de Retorno, que é dado pelo inverso da frequência. Ou seja, uma precipitação com 10 anos de Período de Retorno acontece com uma frequência média de uma vez a cada 10 anos (0,1).

Com as IDF's **atuais e futuras** é possível estabelecer as precipitações críticas (atuais e futuras) para um determinado período de retorno e com essas precipitações, através do modelo hidrológico, quantificar a parcela que é convertida para escoamento superficial, a qual determina o dimensionamento de um sistema de drenagem ou permite avaliar o quão comprometido está o sistema, caso esteja implantado. O conhecimento das características das precipitações intensas é de grande importância para o dimensionamento de obras hidráulicas em geral, tais como: redes de águas pluviais, canalizações de córregos, bueiros e vertedores de barragens.

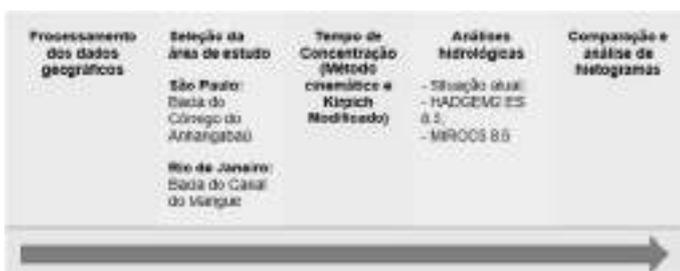
Como as IDF's futuras, nesse trabalho, foram obtidas por meio de desagregações das chuvas de 24 horas com razões de literatura, baseadas em dados observados passados, **não se espera que essas IDF's reproduzam um aumento ou redução significativos** das intensidades para chuvas de curta duração.

## 5.2.2. Modelagem Hidrológica – Método SCS

Tendo em vista a indisponibilidade e/ou inexistência de muitas informações, foi realizada a simulação hidrológica apenas para as cidades de **São Paulo e Rio de Janeiro** (Quadro 5.3). Na metodologia utilizada (método da Curva Número), os valores do parâmetro CN são função do tipo do solo, da cobertura (uso e ocupação do solo) e da umidade do solo, apresentando valor menor ou igual a 100. Quando este é 100, a capacidade de armazenamento da bacia é nula.

Para ambos os casos, (Rio de Janeiro e São Paulo), os estudos tiveram como foco avaliar os possíveis impactos dos eventos extremos de precipitação. Assim, as bacias escolhidas foram analisadas para os mesmos cenários propostos, a saber: (i) Situação atual (IDF Existente), (ii) ETA/HADGEM2-ES 8.5 e (iii) ETA/MIROC5 8.5.

Quadro 5.3. Percurso Metodológico comum aos 2 municípios nos quais a simulação hidrológica foi realizada



(São Paulo e Rio de Janeiro)

### São Paulo

As estimativas do parâmetro CN para São Paulo foram obtidas a partir do Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais do Município de São Paulo (2012). Além do CN atual foi estimado um valor de CN futuro - 2020, horizonte do Plano Diretor de Macrodrenagem da Bacia do Alto Tietê (São Paulo, 2010). Projeções indicam que, caso o padrão de expansão da RMSP seja mantido conforme registros

históricos, **em 2030 a mancha urbana será aproximadamente 38% maior** do que a atual, aumentando os riscos de desastres naturais como enchentes, inundações e deslizamentos de massa em encostas, atingindo cada vez mais a população como um todo e, sobretudo, os mais vulneráveis (NOBRE, 2011).

Para avaliar o comportamento da bacia do Córrego Anhangabaú, adotou-se o parâmetro CN=78, e mantiveram-se as demais características. Observa-se, na modelagem, que houve uma redução expressiva da parcela do escoamento superficial, consequência das condições de uso e ocupação do solo impostas pelo cenário simulado (CN = 78), proporcionando menores precipitações excedentes, ou seja, maiores taxas de infiltração. Isso ocorreu tanto para a situação atual, quanto para os cenários 8.5 simulados pelos modelos ETA/MIROC5 e ETA/HADGEM2-ES. A redução da precipitação excedente leva à redução do pico de vazão no exutório da bacia.

### Rio de Janeiro

Para desenvolvimentos de simulações hidrológicas foram elaborados mapeamentos com locais de ocorrências de alagamento. Em função de disponibilidade dados, adotou-se a bacia Canal do Mangue como área de estudo. Em relação ao cenário atual, observou-se um acréscimo de 15% na vazão de pico, quando comparado ao cenário ETA/HADGEM2 ES 8.5. Considerando o cenário ETA/MIROC5 8.5, esse pico sofreu uma redução de 16%. Isso é reflexo das IDF's encontradas para os dois cenários. Esses valores, entretanto, não devem ser interpretados como verdades absolutas, pois essas curvas foram ajustadas com razões de precipitação inferiores à diária, de literatura, pelo fato dos modelos ainda não conseguirem simular precipitações com uma resolução temporal superior a 3 horas. As razões de 3h/24h, em ambos os modelos, apresentaram-se bastante inferiores aos valores observados de

literatura, os quais são obtidos de dados observados. **A grande diferença de comportamento entre os modelos dificulta a inferência de um padrão futuro de mudanças climáticas.**

Observa-se que as condições de uso e ocupação do solo, impostas pelo cenário simulado (CN = 77), proporcionam maiores taxas de infiltração e conseqüente redução da parcela do escoamento superficial gerado na bacia, tanto para a situação atual, quanto para as simulações dos modelos climáticos utilizados. E dentre os principais efeitos, destaca-se a redução do pico de vazão no exutório da bacia. Para a simulação com o modelo ETA/MIROC5, por exemplo, para uma precipitação total de aproximadamente 50 mm, com um CN = 87 produz-se uma precipitação excedente de pouco mais de 40 mm, enquanto que para um CN = 77, a precipitação excedente, que se traduz em escoamento superficial, é reduzida para aproximadamente 30 mm.

### **5.3 Impactos, mecanismos de adaptação e fragilidades institucionais**

Os dados e informações coletados apontam, nos casos de São Paulo e Rio de Janeiro, situações em que as **mudanças climáticas não estão consideradas no escopo de planejamento**. Os planos de macrodrenagem adotam, de um modo geral, o princípio de estacionariedade das séries climáticas e reproduzem o histórico para o futuro, concentrando a análise de investimentos nos tempos de recorrência dos extremos estocásticos e nos riscos presumidos a partir destas projeções. De modo preliminar, os resultados das projeções dos modelos climáticos, em termos de precipitação, apontam uma redução da precipitação média anual, porém, possivelmente, com ampliação da variação dos extremos. Se por um lado essa redução implica em menor pressão sobre as redes de drenagem, **a variação dos extremos** – e possivelmente o aumento da frequência destes eventos – **pode apontar para a necessidade de**

**ampliação das medidas de projeto das redes, ou outras iniciativas de maior resiliência.**

Para a gestão de enchentes, inundações e alagamentos em centros urbanos são propostos sistemas alternativos, conhecidos como técnicas compensatórias que objetivam retratar e simular cenários da bacia primitiva, ou seja, a bacia sem a ocupação, compensando os efeitos da urbanização. Em termos dos hidrogramas obtidos nas modelagens, as técnicas compensatórias buscam, mesmo após a urbanização, aproximar-se do hidrograma de pré-ocupação. Nota-se que, ao contrário dos sistemas clássicos, as técnicas compensatórias baseiam-se em soluções que reduzem o escoamento e o detém, desacelerando e reduzindo as vazões de pico que chegam aos sistemas da macrodrenagem.

O plano diretor das cidades deve apresentar um zoneamento que contemple áreas permeáveis, preferencialmente em cada lote. Áreas de várzeas e leitos maiores dos rios devem ser preservados. Para garantir a não ocupação dessas áreas, deve-se promover a integração das mesmas à dinâmica urbana, através da implantação de parques e/ou áreas de lazer. A fiscalização deve ser efetiva para que construções irregulares não venham a comprometer o sistema como um todo.

No entanto, dificilmente a aplicação de técnicas não-estruturais é suficiente para solucionar os problemas de enchentes e inundações, principalmente em áreas de intensa urbanização (Baptista *et al.*, 2005). Portanto, as técnicas compensatórias do tipo estruturais passam a ter um importante papel no controle de escoamento da água da chuva. Finalmente, recomenda-se elaboração de um plano de contingências visando descrever as medidas a serem tomadas pelos municípios com a finalidade de obter uma gestão mais eficiente, deixando mais integradas as ações necessárias para o controle de eventos extremos até que as condições normais sejam reestabelecidas.

# INFRAESTRUTURA URBANA

## 5.4 Portfólio de Orientações e Recomendações sobre os Sistemas de Drenagem

Para determinação dos níveis de interesse na avaliação das medidas adaptativas propostas, adotamos os critérios apresentados na Figura 5.1, estabelecidos em SAE-PR (2015). Na Tabela 5.1, destacam-se em escala micro os aspectos relacionados às estruturas existentes, enquanto em escala macro, o planejamento de políticas e sistemas. Muito embora as medidas adaptativas apresentadas na Tabela 5.1 tenham tido o foco nas cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, elas são aplicáveis e recomendáveis para grande parte dos centros urbanos.

Figura 5.1. Abordagem multiescalar sobre mudanças climáticas e as infraestruturas. (Fonte: WANG e SMITH. 2014 *apud* SAE. 2015)

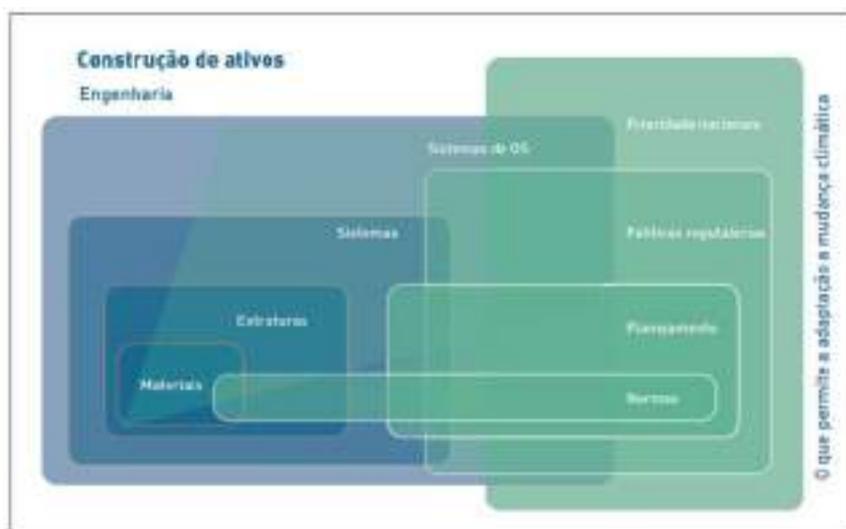


Tabela 5.1. Portfólio de orientações dos sistemas de drenagem

ESCALA	PORTFÓLIO DE ORIENTAÇÕES DOS SISTEMAS DE DRENAGEM		
	RIO DE JANEIRO E SÃO PAULO		
	ABORDAGEM	CENÁRIO ATUAL	MEDIDAS ADAPTATIVAS
MICRO: MATERIAIS E ESTRUTURAS	SISTEMA CLÁSSICO DE MICRO E MACRODRENAGEM	- DISPOSITIVOS DE CAPTAÇÃO E GALERIAS - CANAIS	- CADASTRO GEORREFERENCIADO - AUMENTO DE ÁREAS PERMEÁVEIS - CONTROLE DA QUALIDADE: restauração dos rios urbanos - GERENCIAMENTO DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE MICRO E MACRODRENAGEM
MACRO: PLANEJAMENTO DE POLÍTICAS E SISTEMAS	MEDIDAS ESTRUTURAIS	- RESERVATÓRIOS URBANOS	- MICRORRESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO - TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO - CONTROLE NA FONTE
	MEDIDAS NÃO-ESTRUTURAIS	- LEGISLAÇÃO (LEIS E DIRETRIZES)	- LEGISLAÇÃO MAIS EFICIENTE - FISCALIZAÇÃO E CUMPRIMENTO DAS LEIS - PLANOS DIRETORES E ZONEAMENTO URBANO QUE INCORPOREM AS QUESTÕES DA DRENAGEM URBANA
		- SISTEMA DE ALERTA (LOCAL)	- AMPLIAÇÃO DE REDE HIDROMETEOROLÓGICA - GERENCIAMENTO DE CONTINGÊNCIAS: MONITORAMENTO, ALERTA E ALARME INTEGRADOS EM TEMPO REAL - EDUCAÇÃO AMBIENTAL: processo contínuo
			- RACIONALIZAÇÃO DO USO DO SOLO URBANO: controle da dinâmica de expansão urbana - CRIAÇÃO DE PARQUES E ÁREAS DE LAZER EM ZONAS DE INUNDAÇÃO
			- GESTÃO DE BANCO DE DADOS INTEGRADO ENTRE MUNICÍPIOS, ESTADOS E UNIÃO - CONTROLE DE EROSIÃO E ÁREAS DE RISCO

## 5.5 Incertezas e Limitações Inerentes ao Estudo

### *Indisponibilidade de dados para a modelagem hidrológica e gestão*

Para calibrar e validar o modelo hidrológico são necessárias séries históricas de vazão **no ponto de interesse de estudo** e seriam necessárias informações espaciais de uso e ocupação do solo para aquelas datas passadas, para calibrar e validar o modelo hidrológico. Tendo em vista a indisponibilidade e ou inexistência destas informações, não foi possível fazer a calibração da modelagem hidrológica, restando a possibilidade de verificação do incremento de vazão decorrente de possíveis mudanças climáticas.

## ***Incerteza da representatividade das cidades utilizadas no estudo***

A diversidade dos centros urbanos brasileiros é enorme em todos os aspectos citados. Neste sentido, uma generalização destes resultados para análises nacionais incorre em incertezas enormes e riscos de grandes discrepâncias de valores dos impactos estimados ante as mudanças climáticas. Estudos com um número maior de cidades agrupadas por similaridades, tais como clima, relevo, percentual de área verde, densidade de ocupação, etc, poderiam minimizar essas incertezas e tornar os resultados mais representativos das realidades nacionais.

## ***Ausência de análise do fenômeno “ilha de calor”***

As ilhas de calor urbanas são fenômenos que fogem ao escopo deste trabalho, mas que ao mesmo tempo podem aumentar as incertezas dos resultados: o fato de um eventual aumento de temperatura média em regiões de ocupação densa gerar aumentos de precipitações extremas causadas pela atração exercida por ilhas de calor, como microrregiões de baixa pressão, remete à necessidade de análises mais localizadas que considerem densidades de ocupação como um vetor de mudanças climáticas em microescala e de resposta localizada e imediata a mudanças climáticas em escala global.

## ***Ausência de estudos e simulações da microdrenagem para complementação dos resultados***

A problemática das inundações nos centros urbanos não se resume apenas à macrodrenagem. Muitas vezes, o crescimento das cidades requer alterações do tipo de uso e ocupação do solo. Áreas que possuíam restrições maiores de taxa de ocupação passam a impermeabilizar mais o solo. Quando esse crescimento não é acompanhado por adequações e ampliações da infraestrutura de drenagem, as novas vazões geradas tendem a acumular a montante das estruturas de microdrenagem, como bocas de lobo e galerias de águas pluviais, e os alagamentos tornam-se mais frequentes.

## ***Infraestrutura de drenagem & regulação do uso e ocupação do solo urbano***

Por fim, reforça-se a necessidade de um planejamento urbano “sensível” aos recursos hídricos, nos centros urbanos brasileiros. As águas urbanas devem ser consideradas nos cálculos de taxas de ocupação e aproveitamento do solo urbano e qualquer intervenção na paisagem urbana não deve ser planejada de forma estanque e isolada, sem uma análise sistêmica dos impactos e consequências na macrodrenagem existente e sua capacidade de suporte às alterações constantes no uso do solo, inerentes a qualquer área urbanizada.

## **Referências**

Bertoni, J. C.; Tucci, C. E. M. (1993) Precipitação, In: TUCCI, C. E. M. (org.), Hidrologia: Ciência e Aplicação, Editora da Universidade, Porto Alegre, p. 177-241.

DA SILVA, F. O. E.; PALÁCIO JÚNIOR, F. F. R., CAMPOS, J. N. B. Equação de chuvas para Fortaleza-CE com dados do pluviógrafo da UFC. Revista DAE. nº 192 - maio / agosto (2013).

MARTINEZ JÚNIOR, F.; MAGNI, N. L. G. "Equações de chuvas intensas do Estado de São Paulo." Governo Do Estado De São Paulo-Secretaria De Recursos Hídricos, Saneamento E Obras-Departamento De Águas E Energia Elétrica-Centro Tecnológico De Hidráulica E Recursos Hídricos (1999).

NOBRE, C. A. Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: região metropolitana de São Paulo: relatório final / Carlos A. Nobre, coordenador. – São José dos Campos, SP: INPE, 2011. 192 p.

PIANI, C.; HAERTER, J. O.; COPPOLA, E. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theor Appl Climatol* 99:187-192, 2010.

SÃO PAULO: Revisão do Plano Diretor de Macrodrenagem da Bacia do Alto Tietê (PDMAT) – Relatório Síntese. Relatório DA.0238.PD.AT455-0. Governo Do Estado De São Paulo-Secretaria De Recursos Hídricos, Saneamento E Obras-Departamento De Águas E Energia Elétrica. Março/2010.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *J Hydrol*, 456-457:12-29, 2012.

THEMEBL, M. J.; GOBIET, A; LEUPRECHT, A. Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *Int J Climatol* 31:1530-1544, 2011.

Torrico, J. T. (1974) Práticas Hidrológicas. Rio de Janeiro. Brasil.

WANG, X. e SMITH, S. M. A Multi-Scale Adaptation Nexus for Resilient National Built Assets to Reduce Climate Risks and Mitigate Disasters. **Adaptation Futures** 2014. Fortaleza. Brasil, 2014.

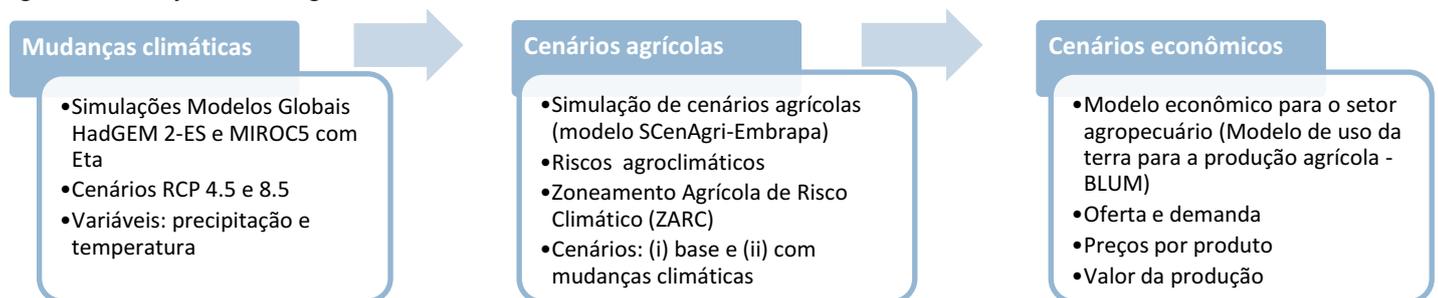
## 6. AGRICULTURA

O setor agrícola tem enorme importância no desenvolvimento socioeconômico do País. Assad *et al.* (2013) destaca a vulnerabilidade do setor às mudanças climáticas. É imperioso conhecer os efeitos e as opções medidas de adaptação às essas mudanças. Neste sentido, o Projeto BRASIL 2040 buscou avaliar os prováveis impactos de diferentes cenários climáticos para esse setor no país, bem como propor medidas de adaptação em um horizonte de 30 anos (2010-2040). No Brasil, o maior fator de risco climático está relacionado às condições hídricas durante o cultivo, uma vez que o suprimento hídrico é quase em sua totalidade advindo das chuvas.

### 6.1 Metodologia

O estudo desenvolvido seguiu as seguintes etapas metodológicas (Figura 6.1): (i) Simulação de cenários agrícolas a partir dos dados climáticos (ETA/HadGEM2-ES e ETA/MIROC5) para os cenários RCP 4.5 e 8.5, estabelecendo as áreas de baixo e alto risco agroclimático por município e por atividade para períodos atuais (2010) e projetados até 2040; (ii) Simulação econômica dos resultados dos cenários agrícolas; e (iii) Propostas de medidas adaptativas às mudanças climáticas.

Figura 6.1 Arranjo metodológico



Os cenários agrícolas foram simulados com uso do modelo SCenAgri-Embrapa<sup>7</sup> que incorporou o efeito das condições climáticas na agricultura brasileira, utilizando modelos de cultura, bancos de dados climáticos e de solos. A metodologia de cálculo de áreas aptas ao cultivo implementada foi a mesma considerada atualmente no Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), e o fator de produtividade adotado foi a disponibilidade hídrica.

O Modelo de Uso da Terra para a Agropecuária Brasileira – BLUM<sup>8</sup> é um modelo econômico dinâmico de equilíbrio parcial, multi-regional e multimercados para o setor agropecuário brasileiro composto por dois módulos: *oferta e demanda* e *uso da terra*. Enquanto o simulador SCenAgri-Embrapa gerou o risco agroclimático potencial para cada atividade agrícola, o BLUM, utilizando dinâmica econômica, gerou equilíbrios de oferta, demanda e preços dos produtos agropecuários para 2040 para seis grandes regiões e também alocou os resultados por microrregião do IBGE para cenários selecionados (cenário de referência e cenário ETA/HadGEM2-ES RCP 8.5).

Os resultados apresentados nesse estudo contemplam o setor agropecuário brasileiro, em especial as culturas de soja, milho (safras de verão e de inverno), feijão (safras de verão e de inverno), arroz, algodão, trigo e cana-de-açúcar. Foram incluídas também análises de impactos para a pecuária bovina e produtos industriais (óleo e farelo de soja, açúcar e etanol, carnes bovina, suína e de frango e leite).

### PREMISSAS DA CENARIZAÇÃO

- Cenário de referência: Plano Nacional de Energia 2050 (MME, 2014); parâmetros macroeconômicos (PIB Brasil e Mundial); crescimento populacional (0,4% aa); consumo de etanol, biodiesel incorporando o B7; dados safra 2014;
- Cenários com mudanças climáticas: considerados os dados da modelagem climática para os cenários 8.5 (sem medidas de mitigação) e 4.5 (com adoção de medidas de mitigação). A expansão de área para lavouras e para agropecuária foi restrita às áreas classificadas como de “baixo risco agroclimático” somadas às áreas atualmente em produção sob alto risco (segundo a PAM, 2012), sob o argumento de que hoje a região já é tomadora de risco e continuará disposta a tal, independente da restrição climática.

<sup>7</sup> Desenvolvido pela Embrapa Informática Agropecuária.

<sup>8</sup> Desenvolvido pela Agroicone.

Estabelecer cenários de longo prazo é um grande desafio, e para tanto busca-se prever comportamentos futuros de variáveis naturais, econômicas, sociais, ambientais, etc. Essas variáveis são projetadas com incertezas, que podem até ser pouco percebidas, mas que têm uma enorme potencialidade de “impactar/contaminar” o cenário projetado e, conseqüentemente, seus resultados (Schwartz, 1996). Isso pode ser observado claramente na projeção de cenários agrícolas que incorporam as mudanças climáticas, através de fatores naturais e antrópicos tais como (Pinto *et al.* 2008; Chen *et al.*, 2011; Hall *et al.*, 2011; Assad *et al.*, 2013; Marcial, 2015):

- (i) Mudanças climáticas: *downscaling*, cenários de emissão, viés dos modelos atmosféricos adotados (HadGEM2-ES, por exemplo, tem viés mais seco que o MIROC5); horizonte de tempo da simulação;
- (ii) Cenários agrícola: cenários macroeconômicos, tendência, fatores exógenos, projeção de variáveis climáticas, eventos futuros não previsíveis, horizonte da simulação, tecnologias propostas.

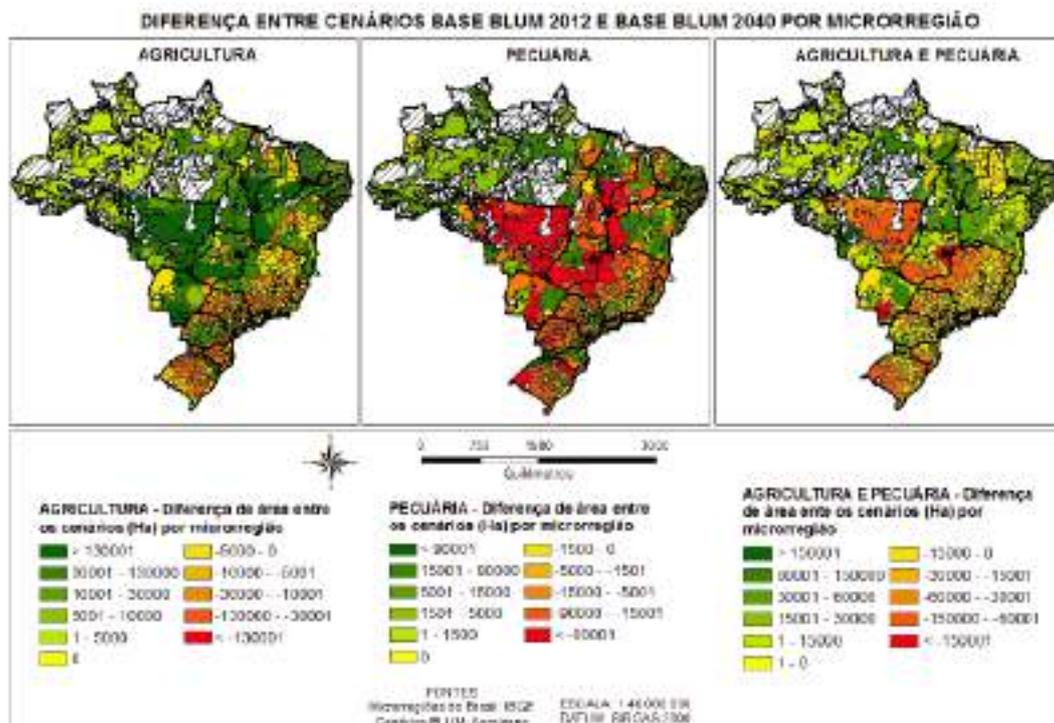
## 6.2 Resultados e Impactos

As simulações do cenário de referência apresentaram taxas de crescimento anuais para o período projetado inferiores às observadas nos últimos dez anos, provocadas por não considerar inovações tecnológicas; e pela menor taxa de crescimento da economia mundial em relação à última década, o que resultou em menor crescimento das exportações.

Mesmo assim, os resultados indicaram forte crescimento do agronegócio brasileiro até 2040 com variações positivas na produção, podendo chegar a 132% para grãos e oleaginosas. Para o uso da terra, prevê-se uma redução da área de pastagens em 14 milhões de hectares, sendo substituída por lavouras e florestas plantadas. Ainda assim, a agropecuária necessitaria incorporar 7,7 milhões de hectares de novas áreas produtivas até 2040 em relação a 2010, sendo que 64% deste total está previsto para ocorrer no bioma Cerrado.

A partir da Figura 6.2 observou-se que as microrregiões que expandiram área alocada para agricultura (lavouras de primeira safra) em 2040 em relação a 2012 apresentaram redução de área de pastagens (pecuária) no mesmo período. As regiões Centro-Oeste e Nordeste Cerrado (composta pelos estados do Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia) e os estados do Paraná e Rio Grande do Sul destacam esta dinâmica.

Figura 6.2 Área alocada para agricultura e pecuária no cenário de referência: diferença entre 2040 e 2012



# AGRICULTURA

Quando as simulações dos cenários agrícolas incorporaram as mudanças climáticas, observou-se:

- Aumento do risco agroclimático nas áreas plantadas em 2012 para quase todas as lavouras em todos os cenários apresentados;
- Redução do potencial produtivo de baixo risco agroclimático para o período projetado (até 2040) (Tabela 6.1);
- Impactos mais relevantes sobre a cultura de soja em todos os cenários apresentados até 2040, inclusive, com previsão de alguns municípios deixarem de produzir soja por serem classificados como alto risco climático (Figura 6.3);
- Impactos diferentes entre regiões, mais relevantes na região Sul do Brasil, importante produtor de grãos e oleaginosas;

Tabela 6.1 Diferenças de variação percentual de área potencial de baixo risco entre os dois RCPs de cada modelo e entre os dois modelos, para as regiões do país.

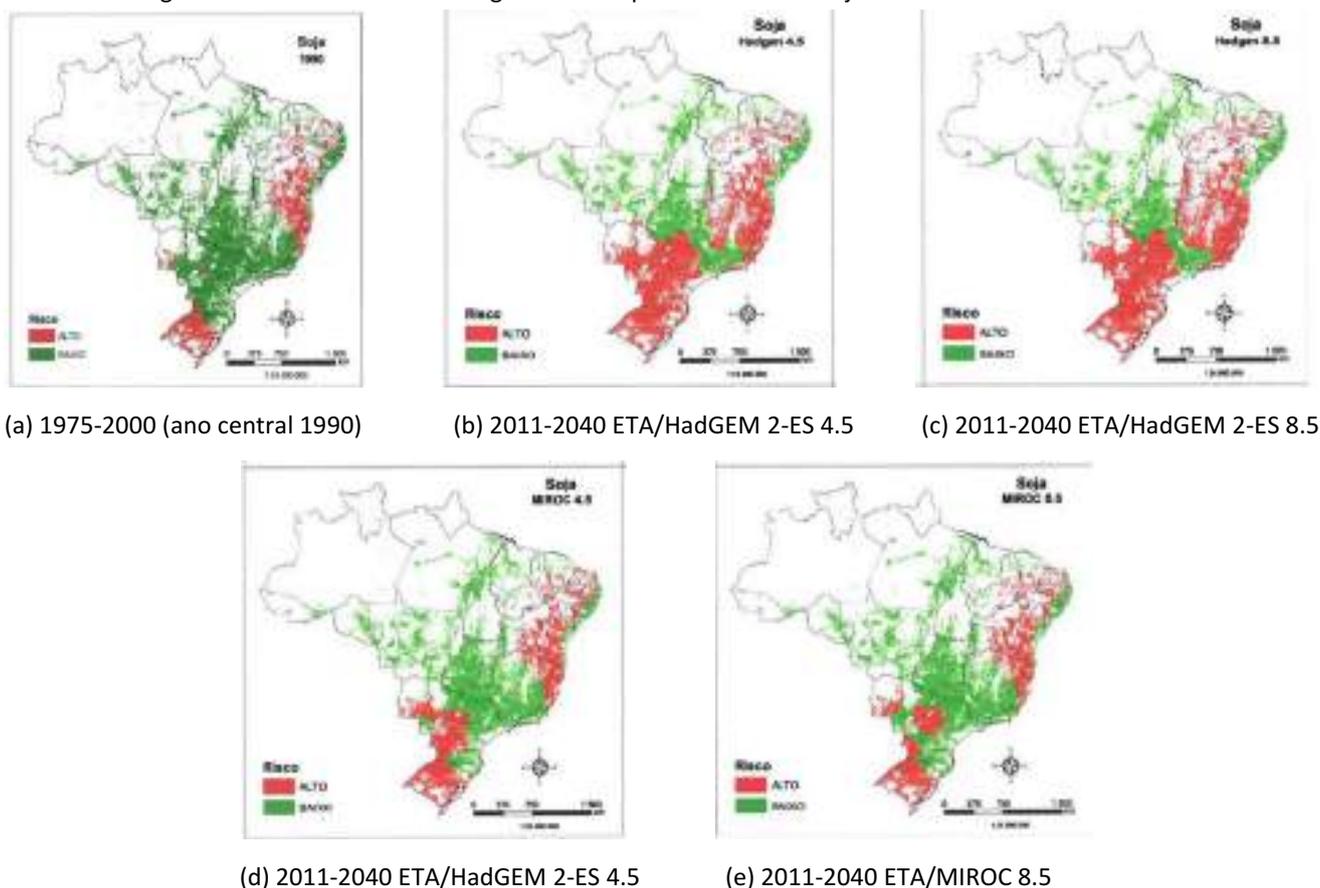
REGIÕES							
Região	Cultura	Área 1990 - A90 (ha)	% da ALA	HadGem rcp8.5-rcp4.5	MInoc rcp8.5-rcp4.5	Had-MInoc 4.5	Had-MInoc 8.5
Norte Área Legal Agricultável - ALA (ha) 25,742,165	Soja	25,742,165	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Milho	25,742,165	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Milho safrinha	25,742,165	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Arroz	25,742,165	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Feijão	25,742,165	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Cana	25,742,165	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Algodão	25,742,165	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Trigo	25,742,165	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Sorgo	25,742,165	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Feijão Cauji	25,742,165	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Nordeste Área Legal Agricultável - ALA (ha) 51,100,316	Soja	25,254,103	49.4%	0.6%	-0.9%	1.8%	3.3%
	Milho	38,823,503	76.0%	4.9%	-2.3%	-16.2%	-9.0%
	Milho safrinha	28,787,281	56.3%	5.7%	-0.6%	-19.7%	-13.4%
	Arroz	11,683,445	23.0%	-3.9%	-0.1%	10.3%	6.4%
	Feijão	28,433,148	55.6%	0.5%	-2.9%	-18.5%	-15.1%
	Cana	47,681,331	93.3%	-0.3%	-1.6%	-22.5%	-21.3%
	Algodão	43,597,749	85.3%	2.8%	-1.8%	-19.8%	-14.7%
	Trigo	27,796,562	54.3%	-2.1%	-1.4%	3.0%	2.3%
	Sorgo	47,497,913	93.0%	1.1%	-1.5%	-19.4%	-16.7%
	Feijão Cauji	40,098,757	78.5%	4.4%	-1.9%	-17.6%	-11.0%
Sudeste Área Legal Agricultável - ALA (ha) 57,254,591	Soja	50,671,316	88.6%	-8.8%	-2.7%	-55.6%	-61.7%
	Milho	57,305,010	100.0%	-7.7%	1.0%	-31.0%	-30.6%
	Milho safrinha	29,898,918	52.3%	0.7%	-27.0%	-97.5%	-69.8%
	Arroz	54,530,813	95.3%	-8.1%	-0.7%	-28.5%	-35.9%
	Feijão	51,994,794	90.9%	-10.7%	2.3%	-50.0%	-63.0%
	Cana	52,724,314	92.2%	-8.0%	-0.1%	-18.8%	-26.7%
	Algodão	57,211,118	100.0%	-8.7%	0.0%	-18.9%	-27.6%
	Trigo	52,094,971	91.1%	-10.8%	-1.1%	-41.9%	-51.7%
	Sorgo	57,211,118	100.0%	-8.8%	0.0%	-13.3%	-22.0%
	Feijão Cauji	57,207,410	100.0%	-7.5%	1.0%	-28.2%	-36.7%
Sul Área Legal Agricultável - ALA (ha) 34,190,315	Soja	19,721,014	57.7%	0.0%	26.7%	-39.6%	-66.3%
	Milho	34,192,477	100.0%	0.3%	0.2%	-9.9%	-9.6%
	Milho safrinha	33,235,992	97.2%	-5.9%	0.0%	-15.1%	-20.9%
	Arroz	34,192,477	100.0%	0.6%	13.2%	-5.1%	-17.7%
	Feijão	34,192,477	100.0%	-3.0%	0.0%	-19.3%	-22.4%
	Cana	7,199,713	21.1%	31.1%	39.8%	96.4%	87.7%
	Algodão	34,046,755	99.6%	-7.0%	1.6%	-12.0%	-20.0%
	Trigo	11,391,631	33.3%	-3.0%	-4.6%	-15.3%	-13.7%
	Sorgo	34,192,477	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Feijão Cauji	34,192,477	100.0%	-0.8%	0.0%	-7.8%	-8.4%
Centro-Oeste Área Legal Agricultável - ALA (ha) 67,612,168	Soja	66,215,571	97.9%	-1.8%	2.9%	-9.9%	-14.5%
	Milho	67,612,168	100.0%	5.4%	0.0%	-8.2%	-4.8%
	Milho safrinha	59,036,168	87.3%	-7.4%	-7.5%	-32.4%	-32.2%
	Arroz	67,608,416	100.0%	-0.2%	1.4%	-7.2%	-8.8%
	Feijão	66,650,805	98.6%	-0.5%	-0.6%	-17.4%	-17.3%
	Cana	67,612,168	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Algodão	67,612,168	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Trigo	66,650,805	98.6%	0.0%	0.2%	-14.6%	-14.7%
	Sorgo	67,612,168	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Feijão Cauji	67,612,168	100.0%	3.5%	0.0%	-6.9%	-3.4%

# AGRICULTURA

Os resultados da Tabela 6.1 indicaram uma tendência predominante de redução de áreas de baixo risco climático para os dois modelos, ou seja, observou-se um claro aumento do risco climático. O modelo ETA/HadGEM2-ES apresentou maior impacto sobre o potencial de área produtiva em comparação ao ETA/MIROC5, para ambos os cenários RCP4.5 e 8.5. Deve-se observar que resultados ETA/HadGEM2-ES indicaram uma majoração no impacto, a qual é fortemente influenciada por seu viés mais seco (ampliação do aumento da temperatura e redução da precipitação).

Os resultados obtidos a partir do modelo ETA/MIROC5 indicaram redução de áreas de baixo risco climático em seis das dez culturas analisadas, apesar de serem menos expressivas se comparados aos resultados do modelo ETA/HadGEM2-ES. Para algumas culturas, ocorreu o aumento de área, ou seja, diminuição do risco climático, principalmente para o milho safrinha, devido ao aumento de chuvas nas regiões e épocas do ano em que o milho safrinha é cultivado. Essa diferença no risco climático estimado entre modelos decorreu das maiores temperaturas projetadas pelo modelo ETA/HadGEM2-ES em relação ao ETA/MIROC5. Por outro lado, o modelo ETA/MIROC5, além de projetar aumentos menores de temperatura, também projetou aumento de precipitação em algumas regiões. As diferenças entre os cenários RCP4.5 e 8.5 foram relativamente pequenas no período estudado de 2011 a 2040, mas se ampliaram com o passar do tempo, devido ao efeito cumulativo da liberação de gases do efeito estufa na atmosfera.

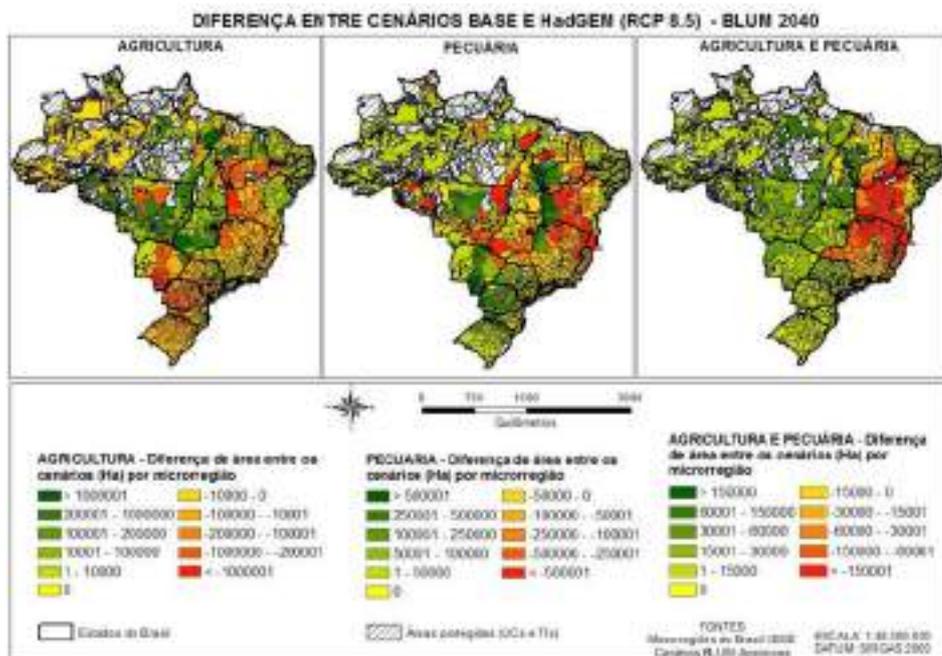
Figura 6.3 Áreas agriculturáveis no Brasil: risco agroclimático para a cultura da soja



Apesar de importantes impactos negativos sobre as lavouras, ainda existe um potencial produtivo relevante para todo o setor, superior à demanda por área apresentado no cenário de referência para 2040 simulado na modelagem econômica. Entretanto, os impactos individuais sobre as atividades agropecuárias e regionais foram relevantes, especialmente no cenário mais extremo sem medidas mitigadoras ETA/HadGEM2-ES RCP 8.5 (Figura 6.4).

# AGRICULTURA

Figura 6.4 Diferença entre cenários ETA/HadGEM2-ES e de referência em 2040 para alocação de área de agricultura e pecuária



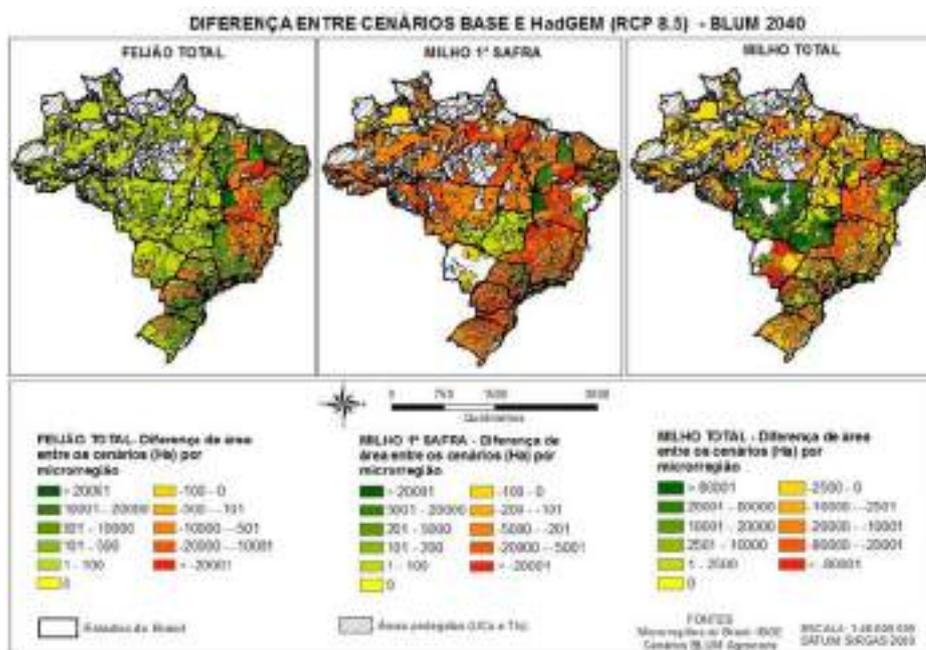
Para área total alocada para agropecuária, as regiões Sudeste (estados de Minas Gerais e Espírito Santo, principalmente) e Nordeste Cerrado (Bahia e Piauí) reduziram o potencial de área produtiva total entre 17% e 33% nos cenários mais extremos simulados pelo Eta/HadGEM2-ES RCP 8.5.

Em contrapartida, as regiões Centro-Oeste Cerrado e Norte Amazônia aumentariam a área de lavouras de primeira safra em 3,3 e 2,7 milhões de ha, respectivamente, o que ocorreria em função do estoque de terras aptas para a agricultura mesmo

levando-se em conta restrições climáticas. Essa expansão está prevista para ocorrer 81% sobre áreas de pastagens no Centro-Oeste e 60% no Norte Amazônia (que inclui a região norte do Mato Grosso).

Apesar da realocação produtiva de lavouras e pastagens, mesmo nos cenários que apresentaram impactos sobre o uso da terra mais extremos (como os simulados pelo Eta/HadGEM2-ES), os impactos sobre a oferta de produtos pecuários foram relativamente pequenos. Esses efeitos foram reduzidos por conta da realocação regional da produção e a intensificação da produção pecuária. Mesmo com uma redução de áreas de pastagem de 7% da área total em 2040, a produção de carne bovina não apresentaria impactos significativos, caindo 2,6% em 2040 em relação ao cenário de referência.

Figura 6.5 Diferença de área alocada para feijão, milho primeira safra e milho total entre os cenários Eta/HadGEM2-ES RCP 8.5 e de referência (2040)



A Figura 6.5 apresenta os resultados para área alocada para feijão, milho primeira safra, milho total (primeira e segunda safras), no modelo econômico por microrregião do IBGE (diferença entre área alocada em 2040 entre o cenário mais extremo Eta/HadGEM2-ES RCP 8.5 e o de referência). Indicou que a área de feijão poderá aumentar na região Sul no cenário Eta/HadGEM2-ES RCP 8.5 em 2040 comparado com o cenário de referência, também compensando parte da perda de área de soja. Algumas microrregiões do Nordeste poderão perder área de feijão, especialmente no centro-oeste da Bahia.

## 6.3 Adaptação

Os resultados apresentados mostram que os impactos das mudanças do clima poderão ser significativos no setor agropecuário brasileiro. Apesar da variação destes impactos entre culturas e regiões, as análises mostram que poderá haver redução na área potencial de baixo risco agroclimático, afetando não só a produção, mas a geografia produtiva com impactos socioeconômicos locais relevantes.

O Quadro 6.1 resume as possíveis medidas de adaptação apresentadas, destacando o grau de dificuldade, incertezas e recomendações de políticas públicas para a implementação em larga escala de cada medida.

Quadro 6.1 Principais medidas de adaptação identificadas, ação esperada, regiões prioritárias, dificuldades e incertezas, políticas públicas

Prática de manejo / Sistemas produtivos/ Infraestrutura	Objetivo e ação de adaptação esperada	Regiões e atividades prioritárias	Dificuldades e incertezas para implementação	Políticas públicas necessárias / Prioridade
<b>Irrigação</b>	Promover a implantação de tecnologias já existentes e desenvolver e/ou adaptar tecnologias para a conservação do solo e da água no sistema de produção para evitar perdas por eventos mais frequentes de chuvas intensas, especialmente as tecnologias que permitem a redução de evaporação, maior infiltração de água do solo, maximizar o aproveitamento e armazenamento de água, adoção de sistemas de irrigação eficientes.	Prioridades por região / estados: Sul, especialmente para o cultivo de soja; São Paulo para cana-de-açúcar; Minas Gerais para o cultivo de milho; oeste da Bahia (onde deve ser intensificado o uso de irrigação para evitar perdas nas áreas atuais de sequeiro); Piauí e Mato Grosso do Sul para o cultivo de soja.	Alto grau de dificuldade para adoção larga escala devido a elevados investimentos para implementação de projetos de irrigação e incertezas sobre disponibilidade hídrica nos cenários de mudança do clima.	Gestão integrada das bacias hidrográficas: aumento de oferta de água para regiões mais afetadas no setor agropecuário; incentivos para implementação de projetos de irrigação localizados; assistência técnica para produtor. Prioridade: alta; ações de curto, médio e longo prazos.
<b>Melhoramento genético</b>	Desenvolvimento de sementes adaptadas às restrições hídricas, à elevada temperatura e a pragas e doenças durante o desenvolvimento das lavouras (especialmente soja, milho e cana-de-açúcar); evitar perdas de produtividade por hectare e migração produtiva regional.	Para melhoramento genético da soja: Oeste da Bahia, Piauí e Mato Grosso do Sul; Para a lavoura de cana-de-açúcar: estado de São Paulo; Para o milho primeira e segunda safras: região Sul e Minas Gerais.	Incertezas em relação a: disponibilização das tecnologias em larga escala; prazo para finalizar os testes desalinhados com as necessidades atuais (como no Sul) e futuras; preços de mercado das variedades; disseminação de tecnologia.	Investimentos em pesquisa e desenvolvimento de variedades adaptadas às restrições climáticas regionais e para as lavouras identificadas; fomentar a disseminação das tecnologias e práticas de manejo adaptadas às restrições climáticas. Prioridade: muito alta; ações de curto e médio prazos.
<b>Integração Lavoura-Pecuária- Floresta</b>	Melhorar as estruturas de conservação do solo (ex. terraços, canais de escoamento gramados, vegetação de áreas suscetíveis à erosão), recuperação de áreas de preservação permanente, condicionadores orgânicos de solo e preservação e ampliação de áreas florestais geradoras de serviços ambientais (ex. recuperação da vegetação ripária e de nascentes em bacias de captação para abastecimento rural e urbano).	A adoção deste sistema integrado de produção deve ser prioritária nas regiões mais suscetíveis às restrições climáticas, combinado a importância na produção nacional (de grãos, carne bovina e cana-de-açúcar), como as regiões Sul e Sudeste.	Alto grau de dificuldade para implementação em larga escala devido à baixa capacitação do produtor e disponibilidade de recursos financeiros para investimentos; incertezas em relação ao mercado madeireiro no futuro.	Avaliar necessidades do mercado florestal via zoneamento agroflorestal; incentivos para implementar esta tecnologia em detrimento de monocultura; assistência técnica para avaliação e implementação do projeto ILPF; crédito rural específico orientado para este sistema (além do Plano ABC); mecanismos para redução de riscos de mercado. Prioridade: alta; ações de curto e médio prazos.
<b>Infraestrutura / Parque industrial</b>	Considerando a realocação produtiva projetada para grãos, oleaginosas, suínos, aves e cana-de-açúcar haverá impactos sobre a infraestrutura logística e “realocação” do parque industrial. Melhorias nos sistemas de transportes de grãos e de cana-de-açúcar são necessários para minimizar os custos e reduzir os impactos nos preços dos alimentos.	Realocação de grãos e oleaginosas (e consequentemente suínos e aves): Centro- Oeste e Amazônia; Setor sucroalcooleiro: região Sul e Sudeste	Incertezas em relação a: real capacidade das outras regiões em expandir produção mais rapidamente; avaliar potencial infestação de pragas e doenças não captadas pelo estudo nas regiões com potencial apto para expansão; entraves em relação a infraestrutura logística para acesso a insumos e comercialização; disponibilidade de mão-de-obra nas regiões potenciais.	Investimentos em infraestrutura logística nas regiões com potencial de expansão produtivo (Centro- Oeste, Norte Amazônia, Nordeste Cerrado); capacitação de mão-de-obra local; incentivos para investimentos na economia local; investimentos em pesquisa para combater pragas e doenças provenientes das mudanças climáticas.

## Referências

CHEN, J., BRISSETTE, F. P., LCONTE, R. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology*, 401 (2011) 190–202.

MARCIAL, E. C. (Org.) *Megatendências mundiais 2030: o que entidades e personalidades internacionais pensam sobre o future do mundo? : contribuição para um debate de longo prazo para o Brasil*. Brasília: Ipea, 2015. 175 p.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; NASSAR, A. M.; HARFUCH, L.; FREITAS, S.; FARINELLI, B.; LUNDELL, M.; BACHION, L. C.; FERNANDES, E. C. M. (2013). *Impactos das Mudanças Climáticas na Agropecuária Brasileira*. Washington, Banco Mundial, 116 p.

SCHWARTZ, Peter. *The art of long view: planning for the future in an uncertain world*. New York: Doubleday, 1996.

HALL, J., MATOS S., SILVESTRE, B., MARTIN, M. Managing technological and social uncertainties of innovation: The evolution of Brazilian energy and agriculture. *Technological Forecasting & Social Change* 78 (2011) 1147–1157.

MME – Ministério de Minas e Energia e EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *Cenário Econômico 2050*. 2014. Rio de Janeiro, Estudos Econômicos, Nota Técnica 12/14, 125 p.

PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; JUNIOR, J. Z.; EVANGELISTA, S. R. M.; OTAVIAN, A. F.; ÁVILA, A. M. H.; EVANGELISTA, B.; MARIN, F. R.; JUNIOR, C. M.; PELLEGRINO, G. Q.; COLTRI, P. P.; CORAL, G. *Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil*. Embrapa, São Paulo, 2008.

## 7. INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

### 7.1 Objetivos do Estudo

Este estudo tem como objetivo analisar as vulnerabilidades da infraestrutura nacional de transporte rodoviário diante de cenários de mudanças climáticas, considerando um horizonte de 30 anos (2010 – 2040), de forma a identificar e classificar estratégias de adaptação, que minimizem os impactos e aumentem a resiliência às mudanças climáticas dessa infraestrutura.

Após uma discussão dos resultados, é apresentada uma análise sucinta das incertezas e limitações inerentes ao estudo, as quais reforçam a necessidade de uma reflexão sobre a utilização destes resultados para planejamento e gestão.

### 7.2 Metodologia e Resultados

#### 7.2.1 Avaliação da Vulnerabilidade

Ao se considerar os impactos sofridos pela infraestrutura, o Primeiro Relatório Nacional de Mudanças (RAN1), desenvolvido pelo Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2012), destaca que:

*“Apesar dos trabalhos existentes na literatura não serem conclusivos em relação ao tema tratado, observa-se convergência para as condições e variações climáticas que afetam o sistema de transporte, dentre elas: variação de temperatura, temperaturas elevadas e muito baixas, tempestades (precipitação intensa), elevação do nível do mar e inundações associadas às tempestades.”*

Neste estudo, são considerados *hotspots* climáticos no Brasil regiões onde determinados níveis de temperatura e precipitação do clima futuro, que se manifestam em eventos climáticos específicos, ultrapassam os limiares de resistência da infraestrutura rodoviária para essas variáveis. Após o tratamento, os dados foram ajustados aos critérios para a avaliação de vulnerabilidade, cujo resultado foi expresso por intermédio do Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária – IVIR.

Foram espacializados dois *hotspots* climáticos: **temperatura e precipitação**. O critério utilizado para a definição dos *hotspots*, considerando a variável climática temperatura do ar, baseou-se na determinação do limite inferior e superior de resistência de pavimento asfáltico, a partir dos quais haveria danos à

#### Premissas Metodológicas

- Para este estudo, foi utilizado um grupo amostral das rodovias brasileiras (com foco nas rodovias estaduais e federais atuais e planejadas até 2030) e realizadas as projeções com os modelos climáticos regionais disponíveis.

- A infraestrutura de transporte rodoviário (estradas) é o maior foco das análises.

- É importante destacar a forte relação dos sistemas de transporte com as mudanças climáticas, em um processo de mão dupla: este sistema não só está interligado com os impactos sofridos e o processo de enfrentamento das mudanças climáticas, como, também, contribui para o incremento dessas mudanças em todo o mundo (emissões de poluentes).

- É importante ressaltar que, frente às limitações encontradas para o seu desenvolvimento, a abordagem ficou restrita à análise dos **padrões de construção, operação e manutenção de dispositivos de drenagem e pavimentos asfálticos** do sistema rodoviário nacional.

- A análise da precipitação tem como objetivo verificar se os dispositivos de drenagem existentes serão **suficientes para atender as alterações climáticas previstas**.

- A análise da temperatura tem por finalidade verificar se o pavimento asfáltico, das rodovias situadas em áreas sujeitas a uma elevação significativa da temperatura ambiente, **resiste a tal tipo de variação**.

- Os índices de extremos climáticos eleitos foram considerados como os mais adequados para se avaliar o potencial impacto do clima futuro nos diferentes tipos de pavimentos asfálticos e nos sistemas de drenagem das rodovias, uma vez que definem máximos de temperatura do ar (*T<sub>Nn</sub>* e *Temp7dias*) e de precipitação pluviométrica (*R<sub>X1day</sub>*). Foram disponibilizados pelo CPTEC/INPE, utilizando a metodologia de Zhang e Yang (2004) e Haylock *et al.* (2006), pelo uso do *software* RCLimdex, do *Canadian Meteorological Service*.

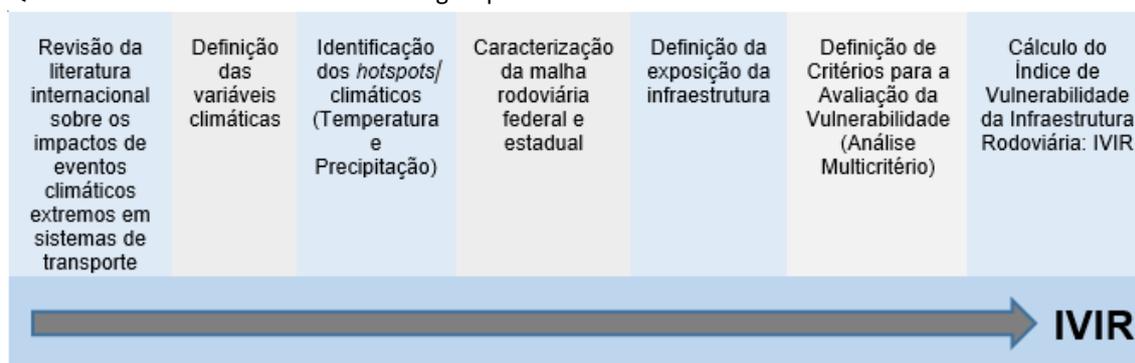
- É importante salientar que existem outros fatores que podem implicar na interrupção do tráfego nas rodovias e **que não são abordados no presente estudo**. A elevação do nível médio dos mares, por exemplo, poderá provocar a inundação de rodovias costeiras. Além disso, a modificação da intensidade e da frequência de ventos extremos poderá acarretar danos em estruturas como pontes, viadutos, passarelas e placas de sinalização. Entretanto, estas variáveis **não são objeto deste estudo**.

# INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

estrutura física das rodovias. Com relação à precipitação, os hotspots foram definidos com base na sobreposição dos mapas de precipitação do clima futuro e a intensidade pluviométrica máxima anual registrada em um dia, para estações pluviométricas estudadas por Pfeistetter (1982), considerando o tempo de recorrência de cinco anos, o mínimo utilizado para dimensionamento de estruturas de drenagem.

Foram gerados quatro *ensembles*<sup>9</sup>, dois para o índice Temp7dias e dois para o RX1day, considerando os RCP4.5 e RCP8.5, para os modelos ETA/HadGEM2-ES e ETA/MIROC5. A opção adotada foi a mais conservadora possível, ou seja, considerou-se a união das faixas de variação dos *hotspots*, par a par: quanto maior a faixa de variação, maior a incerteza na previsão e vice-versa. O Quadro Síntese 7.1 apresenta o percurso metodológico das etapas que se sucederam para a análise de vulnerabilidade.

Quadro Síntese 7.1. Percurso Metodológico para a análise da vulnerabilidade



Para avaliar a vulnerabilidade da infraestrutura de transporte, é necessário fazer a distinção das variáveis climáticas a serem analisadas, tendo em vista que determinados fatores climáticos são pontos chaves para questões de infraestruturas e utilização do sistema de transporte. No que se refere ao clima futuro, tais fatores são denominados “perigo” (hazard).

De acordo com o Quinto Relatório do IPCC (IPCC, 2014b), perigo é definido como “a possível ocorrência de um evento natural ou induzido pelo homem, físico ou tendência, ou impacto físico, que pode causar a perda de vidas, ferimentos ou outros impactos na saúde, bem como perdas e danos à propriedade, infraestrutura, meios de vida, prestação de serviços, e recursos ambientais.”

Com relação à identificação do estado de conservação da malha rodoviária inserida nos *hotspots* foi possível observar que a maior parte, que possui informação, apresenta boas condições de pavimentação, com alguns casos classificados como ruim ou regular. Também, foram identificados os potenciais impactos (defeitos) que podem ocorrer no pavimento, advindos da exposição à temperatura e à precipitação. O estudo realizado pelo IPR (DNIT, 2006), que foi utilizado como referência para essa análise, não leva em consideração as projeções realizadas pelo setor, apenas avalia a situação atual, considerando trechos-teste.

A análise das alterações climáticas relativas à precipitação e temperatura é de fundamental importância para a avaliação da vulnerabilidade das rodovias e para o estabelecimento de estratégias de mitigação e adaptação. Dessa forma, foram analisadas as regiões brasileiras onde tais variáveis sofrerão alterações significativas, de acordo com modelos climáticos já estabelecidos.

De acordo com os resultados, foram observados três padrões de abrangência territorial de *ensemble* de *hotspots* no Brasil, considerando os ambos os índices de extremos climáticos utilizados para definir a vulnerabilidade da infraestrutura rodoviária. Assim, N2, N4 e N5 estão eminentemente associados à faixa litorânea das regiões Nordeste e Sudeste, ao passo que N3 com o *ensemble* de *hotspot* mais extenso, abrangendo 90,0% do

<sup>9</sup> *ensemble* = conjunto, coleção de sistemas em condições idênticas ao sistema que queremos estudar.

# INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

território nacional. O padrão espacial de N1 marca a região delimitada pela diferença de área dos ensembles de hotspots de Temp7dias para os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5, descontadas as áreas dos demais níveis de exposição que lhe intersectam. N3, por sua extensa área, congrega o maior número de segmentos de rodovias ( $n = 4961$ ), que somam mais de 99 mil km. No caso específico de N5, que esta está relacionado ao nível máximo de exposição, há 133 segmentos de rodovias, que somam cerca de 1400 km.

As Figuras 7.1 e 7.2 apresentam, respectivamente, a vulnerabilidade da infraestrutura rodoviária presente e futura, que considera o padrão futuro do clima para a precipitação e temperatura. A vulnerabilidade presente e futura foi obtida pela análise das características da malha rodoviária atual, desde o ponto de vista do perfil administrativo, condições técnicas e de tráfego, bem como a localização dos segmentos rodoviários por Unidade da Federação e Distrito Federal.

Figura 7.1 Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária presente padronizado (IVIR presente-p).



Figura 7.2 Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária futuro padronizado (IVIR futuro-p).



Os segmentos de **alta e muito alta vulnerabilidade** no presente, do ponto de vista dos indicadores analisados, estão associados a segmentos de rodovias situados nos estados do **Acre, Alagoas, Paraíba, Piauí, Rio Grande do Norte, Rondônia e Tocantins**, ao passo que segmentos de outros 14 estados e do Distrito Federal passam a figurar nessas mesmas classes de vulnerabilidade no futuro (Figura 7.2). Considerando ambas as situações, foram registrados 76 e 987 segmentos rodoviários, respectivamente.

A padronização teve por objetivo tornar mais clara a distância relativa entre os valores de vulnerabilidade da malha rodoviária, que passam a se situar entre 0,00 e 1,00. Desta forma, os valores de vulnerabilidade podem ser diretamente comparados e interpretados. Assim, valores altos de IVIRp (iguais ou próximos de 1,00) indicam segmentos rodoviários com maior vulnerabilidade relativa, ao passo que valores inferiores (iguais ou próximos de 0,00) correspondem a segmentos em situação relativa de menor vulnerabilidade.

Cumprido salientar que os mapas de IVIR padronizado para o presente e futuro não devem ser comparados diretamente entre si, pois são representações individualizadas da vulnerabilidade relativa para cada período de tempo analisado.

Do ponto de vista da tipologia de superfície, rodovias pavimentadas (PAV), em leito natural (LEN) e implantadas (IMP) possuem o maior número de segmentos vulneráveis no presente. Para a tipologia PAV, foram contabilizados 1208,2 km referentes a 62 segmentos; para a tipologia LEN, os seis segmentos somaram 198,4 km. Por fim, para o IMP, o total de extensão associado a seis segmentos somou 166,7 km.

Para o período futuro, rodovias planejadas (PLA) e pavimentadas (PAV) agregaram o maior número de segmentos vulneráveis, contando, respectivamente, 8634,3 e 6228,7 km de extensão, no período futuro.

## 7.2.2 Estratégias de Adaptação

No Quadro 7.2 observa-se o resumo do cruzamento das estratégias adaptativas propostas. As medidas de adaptação são subdivididas de acordo com o estressor climático: temperatura e precipitação. No entanto, alguns impactos podem ser comuns a ambos os estressores, como no caso da exsudação. São também diferenciadas de acordo com a estratégia a ser seguida, sendo divididas entre medidas de planejamento, projeto e operação – onde planejamento trata da fase de desenho e concepção da infraestrutura; projeto engloba as questões construtivas; e operação a fase de funcionamento da infraestrutura.

Com base no levantamento de informações sobre os possíveis defeitos e nas propostas de medidas de adaptação elencadas, é possível fazer uma análise mais focada para este estudo, tendo como base o Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura (IVIR) desenvolvido. O Quadro 7.3 mostra, de acordo com o IVIR, o tipo de ação – substituição, prevenção ou melhoria – que deve ser tomada, assim como o prazo para a execução das ações mais convenientes para cada classe de IVIR.

A literatura mostra uma escassez em estudos que avaliem a questão do custo de implementação de medidas de adaptação às mudanças climáticas no setor de transporte. A escolha por medidas de adaptação deve dar preferência àquelas economicamente ótimas, ou seja, onde pode haver benefício para a sociedade. Não é interessante buscar medidas de adaptação que excedam os valores do benefício recebido com a sua implementação (Chinowsky *et al.*, 2013).

## 7.3 Incertezas Inerentes ao Estudo

### *Ausência de dados observados no Brasil*

A ausência de dados observados no Brasil influenciou a seleção das variáveis climáticas da análise. Com base na revisão da literatura e expertise da equipe, foram identificadas e selecionadas as variáveis climáticas relevantes, tendo como referência os padrões construtivos de dispositivos de drenagem e pavimentos asfálticos mais utilizados em rodovias do Brasil. **Tal alternativa foi adotada em virtude da escassez e qualidade restrita de dados pretéritos sobre eventos climáticos e respectivos impactos nas rodovias, em**

território nacional.

### *Incompletude inerente à abrangência espacial do estudo*

Por se tratar de um estudo em nível nacional de um país com dimensões continentais e com uma infraestrutura viária de extensões também continentais, pode-se afirmar que há incertezas inerentes à incompletude de algumas informações como a ausência de análises das rodovias estaduais e municipais. Além disso, a falta de padronização ou a existência de diferentes formas de apresentação também podem ser apontadas como limitações para o desenvolvimento do estudo.

### *Incerteza dos cenários climáticos: hotspots*

Os modelos climáticos são complexos e as incertezas derivam da inerente dificuldade de representação do clima, em que os processos são fortemente não-lineares (mutuamente associados). Pequenos erros nos dados no início da simulação podem levar a resultados completamente diferentes, após vários intervalos de tempo. Com o objetivo de **reduzir as incertezas associadas aos cenários climáticos**, a análise dos *hotspots* foi refinada com base na geração de *ensembles*. A opção adotada foi a mais conservadora possível, ou seja, considerou-se a união das faixas de variação dos *hotspots*, para a par: **quanto maior a faixa de variação, maior a incerteza na previsão e vice-versa.**

### *Incerteza inerente à análise multicritério*

A avaliação da vulnerabilidade foi realizada através de **critérios de sensibilidade e capacidade adaptativa com base na opinião de especialistas** brasileiros em infraestrutura rodoviária. Essa avaliação qualitativa, transformada em avaliação quantitativa, pode trazer um viés de análise, pois se baseia em opiniões.

### *Incerteza inerente às diferenças de magnitudes entre os hotspots*

Pode-se verificar que a existência de grande parte da malha rodoviária sob o *hotspot* de temperatura poderá vir a provocar a necessidade de intervenções de engenharia nas rodovias existentes e a necessidade de adequação dos projetos para as rodovias planejadas. Em relação à precipitação, cabe destacar as áreas sujeitas a sofrerem efeitos das variações climáticas têm magnitude reduzida.

# INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

Quadro 7.2. Matriz de Estratégias de Adaptação (Estressor Temperatura) elaborada a partir de impactos relacionados no IPR

Impacto		Estratégia	
Estressor Climático: Temperatura	Planejamento	Projeto	Operação
<b>Afundamento do pavimento (pavementrutting)</b>	Instituir regulamentação de restrição de carga nas rodovias.	Usar materiais e ligantes ( <i>binders</i> ) mais tolerantes a altas temperaturas. Projetar construções apropriadas, com a sobreposição de tipos de asfalto mais resistentes e robustos.	Corrigir os sulcos/afundamentos no pavimento ( <i>mill out ruts</i> ). Realizar inspeções e manutenção com maior frequência. Monitorar a condição do solo das estradas existentes. Aumentar a limpeza e a manutenção das estradas e seus arredores. Realizar plantio de vegetação ao longo das vias para diminuir a exposição das rodovias ao calor.
<b>Trincamento (por fadiga; em bloco; transversal e longitudinal)</b>		Substituir o concreto por asfalto de alta resistência quando houver necessidade (trincamentos/rupturas/ <i>blows out</i> ).	Realizar inspeções e manutenção com maior frequência. Monitorar a condição do solo das estradas existentes. Aumentar a limpeza e a manutenção das estradas e seus arredores. Realizar plantio de vegetação ao longo das vias para diminuir a exposição das rodovias ao calor.
<b>Exsudação (tráfego + temperatura)</b>	Instituir regulamentação de restrição de carga nas rodovias.		Encorajar o transporte de cargas pesadas a viajar no período noturno quando a temperatura ambiente é menor, afetando menos o asfalto.
<b>Estressor Climático: Precipitação</b>			
<b>Desgaste do revestimento ( IPR)</b>	Adaptar os padrões de construção para os novos eventos.	Usar materiais de melhor qualidade e resistentes a erosão.	
<b>Afundamento nas trilhas de roda (IPR)</b>	Melhorar o sistema de previsão do tempo a fim de conseguir promover melhores planos de ação e se preparar melhor para potenciais danos.	Melhorar a infraestrutura de drenagem (bueiros) para ser capaz de lidar com os eventos intensos de chuvas. Prever túneis de drenagem em baixo de grandes estradas para facilitar a drenagem de forma mais rápida.	Revisar os drenos com frequência. Melhorar as fundações.
<b>Desnívelamento entre pista e acostamento</b>	Adaptar os padrões de construção para os novos eventos. Implementar sistemas de avisos e planos de evacuação para eventos extremos de chuvas e inundações.	Usar materiais de melhor qualidade e resistentes a erosão. Melhorar a infraestrutura de drenagem (bueiros) para ser capaz de lidar com os eventos intensos de chuvas. Prever túneis de drenagem em baixo de grandes estradas para facilitar a drenagem de forma mais rápida. Elevar estruturas.	Melhorar as condições de monitoramento do subleito especialmente após grandes chuvas e/ou enchentes. Realizar manutenção regular. Revisar os drenos com frequência. Melhorar as fundações. Melhorar as condições de monitoramento do subleito especialmente após grandes chuvas e/ou enchentes. Realizar manutenção regular.
<b>Afundamento do pavimento (pavementrutting)</b>	Instituir regulamentação de restrição de carga nas rodovias.	Usar materiais de melhor qualidade e resistentes a erosão. Projetar construções apropriadas, com a sobreposição de tipos de asfalto mais resistentes e robustos.	Corrigir os sulcos/afundamentos no pavimento ( <i>mill out ruts</i> ). Realizar inspeções e manutenção com maior frequência. Monitorar a condição do solo das estradas existentes. Aumentar a limpeza e a manutenção das estradas e seus arredores. Realizar plantio de vegetação ao longo das vias para diminuir a exposição das rodovias à erosão.

Fonte: Elaboração própria baseado em CCSP (2008); CCSP (2009); Eichhorst (2009); CEDR (2012); NJTPA (2012); World Road Association (2012).

# INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

Quadro 7.3. Medidas de adaptação para classes do Índice de Vulnerabilidade

Índice de Vulnerabilidade	Tipo de Ação	Prazo de Execução	Ações
0,81 – 1,00	Substituição	Longo	Retirada completa da estrutura existente e construção de nova estrutura com resistência superior. Considerar execução de novo projeto geométrico.
0,61 – 0,80	Substituição	Longo	Retirada completa da estrutura existente e construção de nova estrutura com resistência superior.
0,41 – 0,60	Preservação	Médio	Reestruturação de ativos existentes, com substituição de estruturas em caráter pontual.
0,21 – 0,40	Preservação	Médio	Reestruturação de ativos já existentes.
0,00 – 0,20	Melhoria	Curto	Respostas de Operação & Manutenção. Correção de defeitos locais.

Fonte: Elaboração própria.

## 7.4 Considerações Finais

Até certo ponto, as informações apresentadas podem gerar falsa sensação de segurança do sistema para os decisores, ao constatarem a situação atual do pavimento como sendo satisfatória. No entanto, os resultados da avaliação de vulnerabilidade mostram um panorama mais preocupante para o futuro, constituindo-se assim em um sinal de alerta que não pode ser desprezado. Ou seja, a situação futura tende a ser diferente. Portanto, criar um sistema de transporte resiliente às mudanças do clima pode ser vital para salvaguardar a infraestrutura, além de assegurar mobilidade e desenvolvimento vitais para o setor (EICHORST, 2009). Mais ainda, é necessário que estudos realizados com foco nas mudanças climáticas não sejam apenas no âmbito global e nacional, mas também no local. A forma como o estudo se desenvolve pode resultar em melhores análises e propostas de ação, contribuindo para com os tomadores de decisão de diferentes instâncias (OSLAKOVIC *et al.*, 2013).

### Referências

CEDR – Conference of European Directors, 2012. Adaptation to Climate Change. Org. Grendstad, G. Project Group on Climate Change.

CHINOWSKY, P.S.; PRICE, J.C.; NEUMANN, J.E., 2013. Assessment of climate change adaptation costs for the U.S. road network. *Global Environmental Change* 23 (2013) 764–773

COCHRAN, I., 2009. Climate Change Vulnerabilities and Adaptation possibilities for transport infrastructures in France. *Climate Report Research*. Issue n°18

EICHORST, U., 2009. Adapting urban transport to climate change. In: *Sustainable Transport: A Sourcebook for Policymakers in Developing Cities*. [(Org.) GTZ Sourcebook]. Disponível em: <http://www.sutp.org/index.php/en-dn-th5>.

EUROPEAN COMMISSION, 2013. Green Paper. Study to support an impact assessment of the urban mobility package - Activity 31 Sustainable Urban Mobility Plans. Final Report. October 2013, DG MOVE.

FHAW – Federal Highway Administration. 2012. Assessing Vulnerability and Risk of Climate Change Effects on Transportation Infrastructure: Pilot of the Conceptual. *Climate Change Vulnerability Assessment Pilots*.

HAYLOCK, M.R., PETERSON, T.C., ALVES, L.M., AMBRIZZI, T., ANUNCIACÃO, Y.M.T., BAEZ, J., BARROS, V.R., BERLATO, M.A., BIDEGAIN, M., CORONEL, G., GARCIA, V.J., GRIMM, A.M., KAROLY, D., MARENGO, J.A., MARINO, M.B., MONCUNILL, D.F., NECHET, D., QUINTANA, J., REBELLO, E., RUSTICUCCI, M., SANTOS, J.L., TREBEJO, I. & VINCENT, L.A. 2006. Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. *Journal of Climate* 19: 1490-1512.

IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.

KALANTARI Z., 2011. Adaptation of Road Drainage Structures to Climate Change. ISBN 978-91-7501-217-9. Disponível em: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:507167/FULLTEXT01.pdf>

KALANTARI, Z.; FOLKESON, L., 2013. Road Drainage in Sweden: Current Practice and Suggestions for Adaptation to Climate Change. *J. Infrastruct. Syst.* 2013.19:147-156. ISSN 1076-0342/2013/2- 147-156

NJTPA – New Jersey Transportation Planning Authority, Climate Change Vulnerability and Risk Assessment of New Jersey's Transportation Infrastructure, April 2012.

OSLAKOVIC, I.S.; TER MAAT, H.; HARTMANN, A; DEWULF, G., 2013. Risk Assessment of Climate Change Impacts on railway infrastructure. Engineering Project Organization Conference. Devil's Thumb Ranch, Colorado. July 9-11, 2013. Proceedings – EPOC 2013 Conference.

PBMC. PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. 2012. Base Científica das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 para o 1o Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Volume Especial para a Rio+20. Sumário Executivo do Volume 1. PBMC. Rio de Janeiro. 34 pp

PBMC. PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. 2014. Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Assad, E.D., Magalhães, A.R. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 414 pp. ISBN: 978-85-285-0207-7.

RATTANACHOT, W. WANG, Y., CHONG, D, SUWANSAWAS, S. 2015. Adaptation strategies of transport infrastructures to global climate. *Transport Policy* (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.03.001>

WORLD ROAD ASSOCIATION, 2012. Dealing with the effects of climate change on road pavements. 146P. ISBN 2840602474. Disponível em: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1222665>

ZHANG, X. & YANG, F. 2004. RCLimDex (1.0) User Guide. Climate Research Branch Environment Canada. Ontario, Canada. 22p.

## 8. ENERGIA

Os sistemas energéticos estão sujeitos a impactos advindos de alterações no clima, tanto na produção de energia quanto no seu consumo (Lucena *et al.*, 2009; Schaeffer *et al.*, 2012). As fontes renováveis são especialmente relevantes nesse sentido, uma vez que sua renovabilidade depende, fundamentalmente, do clima. A geração de hidroeletricidade, por exemplo, depende do ciclo hidrológico; o plantio de biomassa para a produção de biocombustíveis líquidos depende das condições edafoclimáticas da localidade onde ocorre o cultivo; o regime de ventos define o potencial de geração de energia eólica; a formação de nuvens tem impacto sobre a quantidade de radiação solar usada para a geração de energia solar.

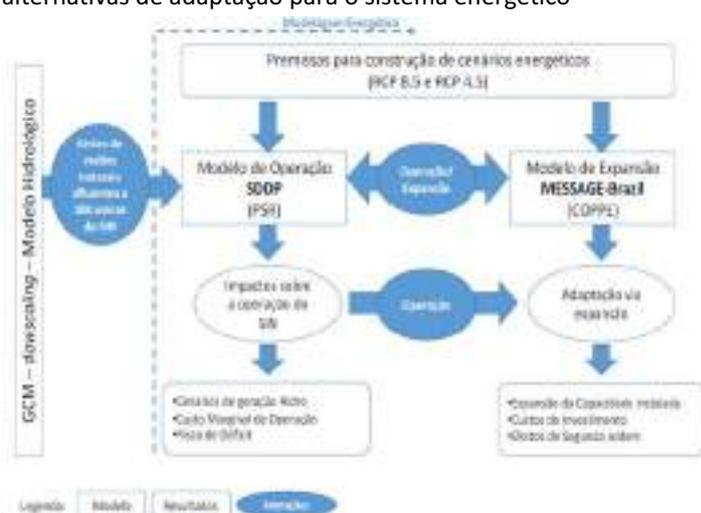
Atualmente, a metodologia utilizada para o planejamento da operação e expansão do Sistema Interligado Nacional (SIN) pressupõe que variáveis climáticas são estacionárias (i.e. que suas propriedades estatísticas se mantêm constantes ao longo do tempo). Dessa forma, os impactos que as mudanças climáticas podem ter sobre o sistema energético não são levados em conta no planejamento energético convencional. Esse estudo inova ao considerar as alterações nas variáveis climáticas e conseqüentemente no regime hídrico para avaliar o impacto sobre o sistema energético brasileiro. Portanto, é de crucial importância analisar as vulnerabilidades do sistema energético e incorporar ao planejamento energético políticas que possam ajudar a enfrentar os desafios do aquecimento global.

### 8.1 Metodologia

O estudo setorial de energia seguiu a abordagem proposta por Moss *et al.* (2010), em que a avaliação de impactos e alternativas de adaptação segue uma abordagem paralela a partir das Trajetórias de Concentração Representativa (Representative Concentration Pathways (RCPs)). Segundo essa abordagem, os RCPs indicam cenários de forçamento radiativo que foram usados, simultaneamente, para as modelagens climática e, conseqüentemente, hidrológica, e para a construção de cenários de referência sobre os quais foram avaliados os impactos e alternativas de adaptação. As séries hidrológicas foram produzidas no âmbito do projeto com base nos modelos de circulação global MIROC5 e HadGEM2-ES com *downscaling* pelo modelo ETA, para avaliar os impactos sobre a geração hidroelétrica no SIN e suas repercussões sobre o sistema energético, e de uma metodologia de otimização para avaliar as opções de adaptação de mínimo custo para o sistema energético (modelos SDDP<sup>10</sup> e MESSAGE-Brasil<sup>11</sup>) (Figura 8.1).

Os resultados do estudo do setor energético foram gerados a partir de um conjunto de projeções climáticas e hidrológicas que foram realizadas pelos grupos de cenários climáticos e recursos hídricos. De outro lado, projeções climáticas estão sujeitas a um conjunto grande de incertezas, que se agravam na medida em que essas informações são usadas em modelagens setoriais. Portanto, deve-se observar que os resultados são função desses dados hidrológicos.

Figura 8.1 Procedimento para Avaliação de impactos e alternativas de adaptação para o sistema energético



Modelo de operação: (i) Estatísticas operativas; (ii) Custos marginais de curto prazo (*spot prices*); (iii) Benefícios marginais de capacidade.

Modelo de expansão: (i) formulação de estratégias para atendimento de demanda, com minimização de custo total do sistema; (ii) construção de fluxos de energia que descrevem o sistema energético.

<sup>10</sup> O SDDP é um modelo de despacho hidrotérmico estocástico com representação da rede de transmissão para estudos de operação de longo, médio e curto prazo. Seu nome vem da metodologia de otimização da política operativa ("Stochastic Dual Dynamic Programming" – programação dinâmica estocástica dual) desenvolvida originalmente por Mario Veiga, da PSR.

<sup>11</sup> O MESSAGE-Brasil é uma versão do software de otimização de sistemas energéticos MESSAGE (*Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts*) desenvolvido originalmente pelo IIASA (*International Institute for Applied System Analysis*) que vem sendo adaptado pela equipe de pesquisadores do CENERGIA/PPE/COPPE para o sistema energético brasileiro.

## 8.2 Descrição dos Cenários

Foram construídos dois cenários de operação e expansão do sistema energético brasileiro até 2040, que serviram de base para a avaliação e impactos e alternativas de adaptação. Nesse estágio, foram gerados cenários sem (*linha de base ou referência*) e com mudanças climáticas para RCP 8.5 e 4.5 (Tabela 8. 1):

- RCP 8.5, que pressupõe um sistema energético em que não há preocupação explícita com mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), o que levaria o mundo a um forçamento radiativo de 8.5 w/m<sup>2</sup> em 2100;
- RCP 4.5, em que medidas para redução de emissões são adotadas, assumindo-se a premissa de que o Brasil tomaria parte no esforço global de mitigação compatível com um forçamento radiativo de 4.5 w/m<sup>2</sup> em 2100.

Tabela 8. 1 Cenários rodados na modelagem energética

Cenários	Linha de Base	Cenários com impactos climáticos	
<b>RCP 8.5</b>	<b>Cenário: Base 8.5</b> Sistema energético do RCP 8.5, sem impactos de mudanças climáticas	<b>Cenário: HadGEM2-ES 8.5</b> Sistema energético do RCP 8.5, com impactos projetados pelo Eta/HadGEM2-ES RCP8.5	<b>Cenário: MIROC5 8.5</b> Sistema energético do RCP 8.5, com impactos projetados pelo Eta/MIROC5 RCP 8.5
<b>RCP 4.5</b>	<b>Cenário: Base 4.5</b> Sistema energético do RCP 4.5, sem impactos de mudanças climáticas	<b>Cenário: HadGEM2-ES 4.5</b> Sistema energético do RCP4.5, com impactos projetados pelo Eta/HadGEM2-ES RCP4.5	<b>Cenário: MIROC5 4.5</b> Sistema energético do RCP 4.5, com impactos projetados pelo Eta/MIROC5 RCP 4.5

As projeções de demanda elétrica (segmentos residencial, industrial, comercial e outros) e expansão para o setor elétrico foram construídas conforme as premissas apresentadas na Tabela 8. 2.

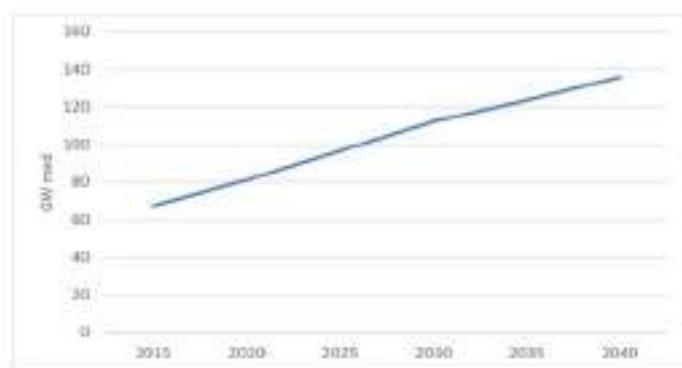
Tabela 8. 2 Premissas para construção dos cenários do setor de energia

Cenários de Demanda	Premissas
<b>Projeção de Demanda Elétrica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Um cenário macroeconômico, cuja variável-chave é a taxa de crescimento do PIB;</li> <li>• Um cenário de evolução da população, resumido pela taxa de crescimento populacional;</li> <li>• Estimativas para a evolução futura de alguns parâmetros técnicos, como, por exemplo a elasticidade consumo-renda (obtida com base nos dados históricos de mercado) e nível de perdas elétricas no sistema, além de considerações sobre as características e os perfis prováveis desse mercado no futuro.</li> </ul>
<b>Expansão para o Setor Elétrico no Longo-Prazo - Aspectos regulatórios-</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exigência de 100% de cobertura da demanda por contratos e certificados por garantia física</li> <li>• As incertezas no crescimento da demanda</li> <li>• Os leilões de reserva de geração também poderão levar a uma oferta adicional.</li> <li>• Após 2030: Não foi considerada a entrada de novas hidroelétricas.</li> </ul>

A partir das projeções de consumo, e considerando hipóteses adicionais sobre a evolução das perdas elétricas, foram projetadas as cargas próprias de energia para os quatro Subsistemas Elétricos Interligados – Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul, incluindo as interligações com os Subsistemas atualmente isolados Acre/Rondônia e Manaus, e, a partir destes, para os Sistemas Interligados Norte/Nordeste e Sul/Sudeste/Centro-Oeste, assim como para o SIN. A Figura 8.2 consolidou a projeção do requisito de energia (carga própria) do sistema até 2030, incluindo as interligações Acre/Rondônia e Tucuruí/Manaus/Macapá e a carga da ANDE.

# ENERGIA

Figura 8.2 Projeção do requisito energia



A elaboração do Cenário de Expansão procurou retratar a tendência da expansão do Setor Elétrico Brasileiro (dada as opções de expansão disponíveis) de maneira a aderir com o Cenário de Mercado de Energia Elétrica. O Cenário de Expansão foi construído considerando a competitividade das diversas tecnologias (mínimo custo global para o consumidor) e aspectos regulatórios do sistema brasileiro que afetam a expansão. As opções de expansão do sistema estão apresentadas na Figura 8.3.

Figura 8.3 Opções de expansão da geração



## Cenários de Linha de Base

Como apresentado na Tabela 8. 1 foram gerados cenários para os forçantes 8.5 e 4.5. No caso do cenário RCP 8.5 de linha de base (i.e. sem considerar impactos de mudanças climáticas) a expansão do sistema segue as premissas e critérios apresentados anteriormente (Tabela 8. 2 e Figura 8.3) diretamente até o ano de 2030, sem que haja qualquer esforço adicional para mitigar as emissões de GEE. Segundo esse cenário, o sistema energético brasileiro segue uma trajetória de menor custo, sem considerar quaisquer restrições ao setor energético exceto as restrições de disponibilidade de recursos.

No cenário linha de base RCP 4.5 assumiu-se esforços de mitigação das emissões de GEE, que, no curto prazo, se dariam essencialmente por opções de eficiência energética e penetração de geração solar distribuída. Assim, a demanda elétrica no cenário RCP 4.5 chegaria, em 2030 com valores 12% menores do que a do RCP 8.5, mantendo esse percentual até 2040 (Figura 8.4; Figura 8.5). Após 2030, os cenários RCP 8.5 e 4.5 são basicamente diferenciados pela adoção de um custo para o carbono<sup>12</sup> e uma maior penetração de eficiência energética nos cenários RCP 4.5, com vistas a internalizar o esforço de mitigação de GEE no sistema energético brasileiro.

<sup>12</sup> Custos de CO2 no valor de 100 US\$/tCO2 foram aplicados sobre as economias regional e global considerando todos os gases de efeito estufa. Para gases de efeito estufa que não o CO2, foram aplicados os coeficientes do IPCC AR4 (IPCC AR4 100-year Global Warming Coefficients)

# ENERGIA

Figura 8.4 Comparação dos cenários de demanda RCP 8.5 e RCP 4.5

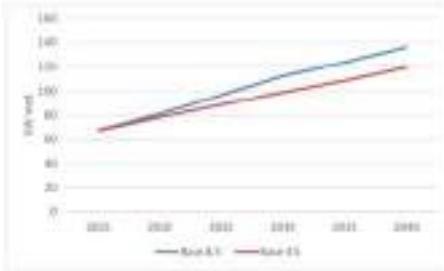
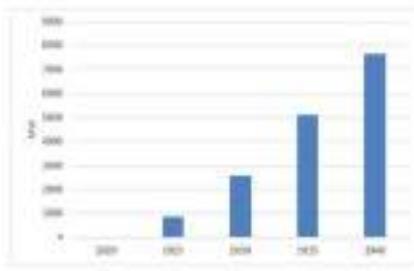


Figura 8.5 Penetração de geração de energia solar distribuída no cenário RCP 4.5 – MW



## Cenários com impactos climáticos

Os cenários com impactos climáticos foram gerados para os sistemas energéticos 4.5 e 8.5 incorporando os cenários hidrológicos com mudanças climáticas. Os resultados apresentados no Capítulo Recursos Hídricos mostraram uma tendência de queda na vazão média na maior parte das bacias hidrográficas brasileiras.

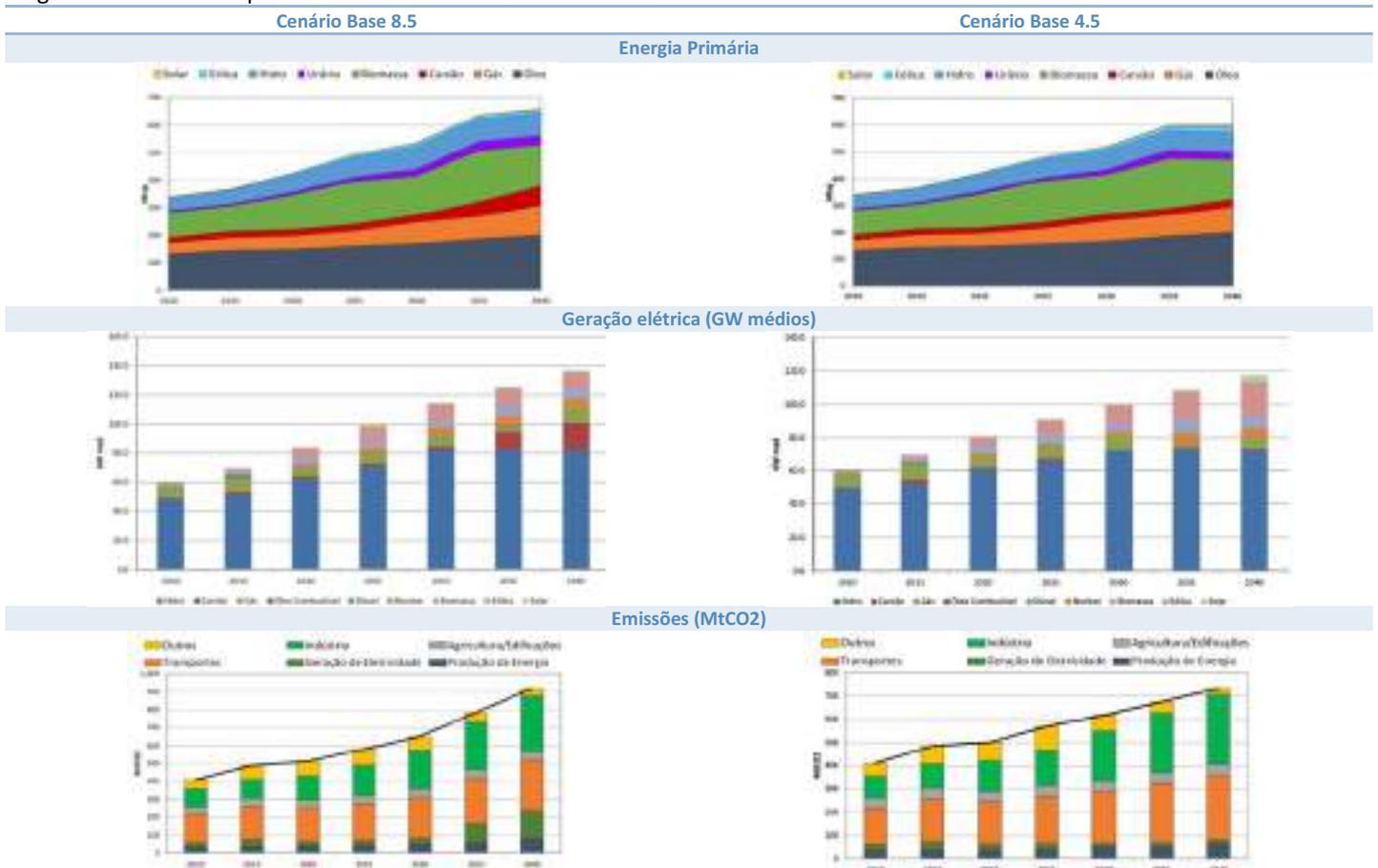
### 8.3 Resultados e impactos

Nesta seção são apresentados os resultados dos cenários de linha de base e cenários com mudanças climáticas.

A Figura 8.6 apresenta os resultados do consumo de energia primária, geração elétrica e emissões para os cenários de linha de base sem mudanças climáticas. Observou-se que o consumo de energia primária crescerá a uma taxa média de 2,25% ao ano até 2040 para o cenário Base 8.5, e 1,92% para o cenário Base 4.5. Percebeu-se um aumento na participação de fontes fósseis na matriz energética brasileira, em especial do

carvão mineral e do gás natural. O consumo de óleo, também crescerá até 2040, porém a uma taxa mais baixa em função de ganhos de eficiência no setor de transportes. O aumento no uso do carvão ocorreria devido ao aumento no uso dessa fonte para geração elétrica a partir de 2030. Como resultado do aumento no uso de carvão mineral para geração elétrica, esse segmento aumentaria suas emissões de CO<sub>2</sub> após 2035. A indústria passaria a ser o setor com maiores emissões, ultrapassando o setor de transportes.

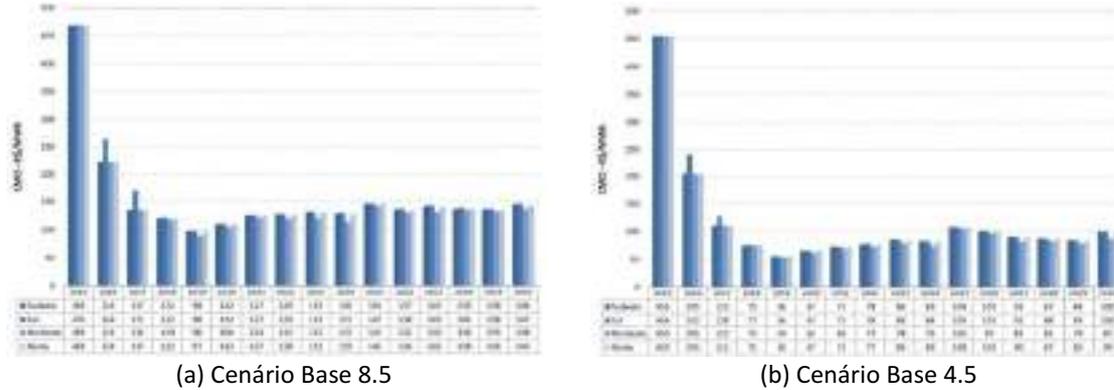
Figura 8.6 Resultados para os cenários de linha base 8.5 e 4.5



# ENERGIA

A Figura 8.7 mostra a projeção do valor esperado dos custos marginais de operação (CMOs) para cada ano resultante, para os cenários 8.5 (a) e 4.5 (b). Os valores altos de CMO calculados para os anos de 2015 e 2016 foram consequência não somente da baixa afluência verificada no período úmido 2013/2014 como também por problemas estruturais, como o fator de fricção das hidrelétricas. A queda no CMO do cenário Base 4.5 com relação ao Base 8.5 se deu fundamentalmente devido à menor demanda elétrica adotada no cenário.

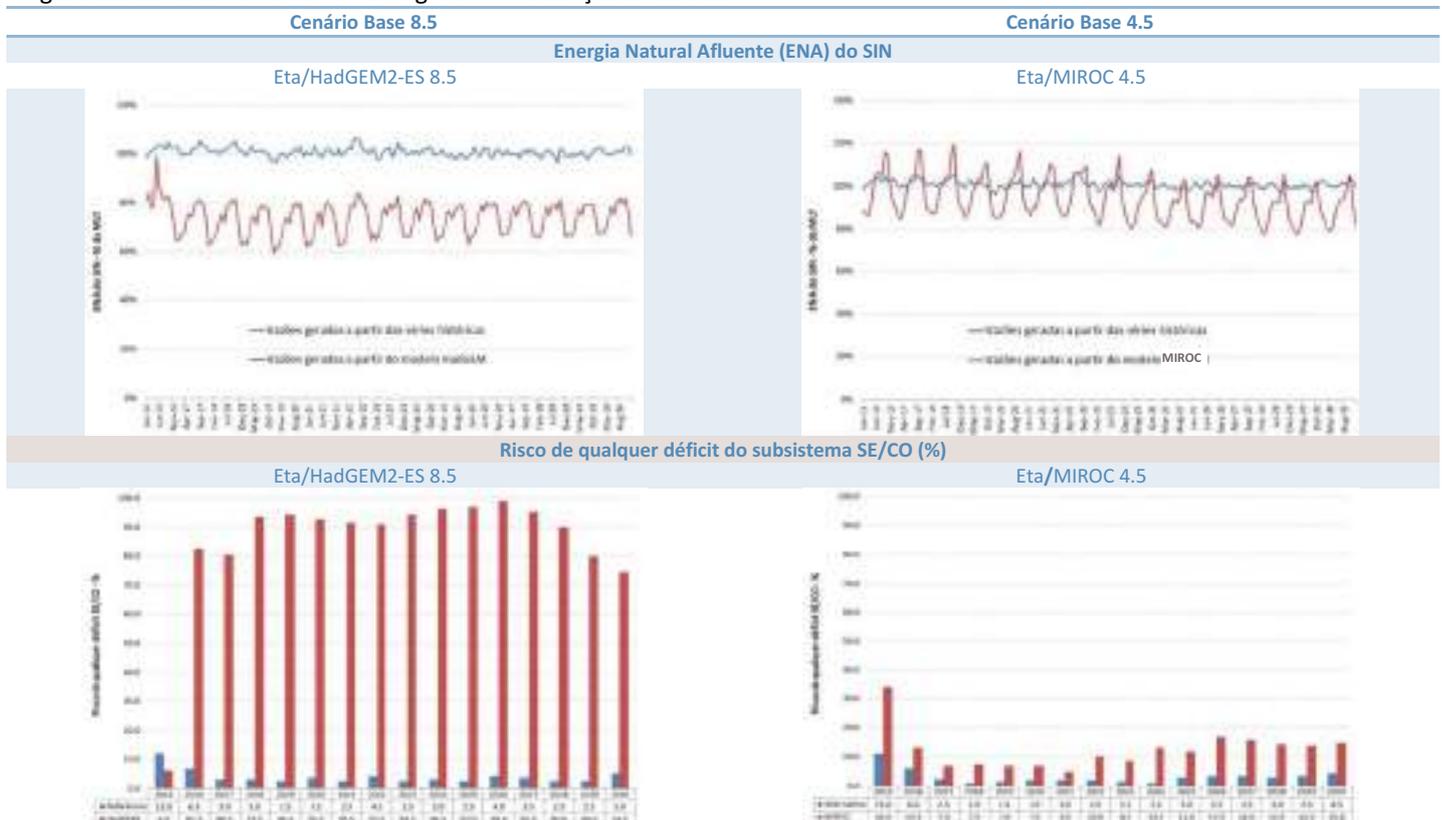
Figura 8.7 Custo marginal de operação médio do setor energético brasileiro



Observou-se os seguintes impactos nos cenários projetados com mudanças climáticas (Figura 8.9 e Figura 8.10):

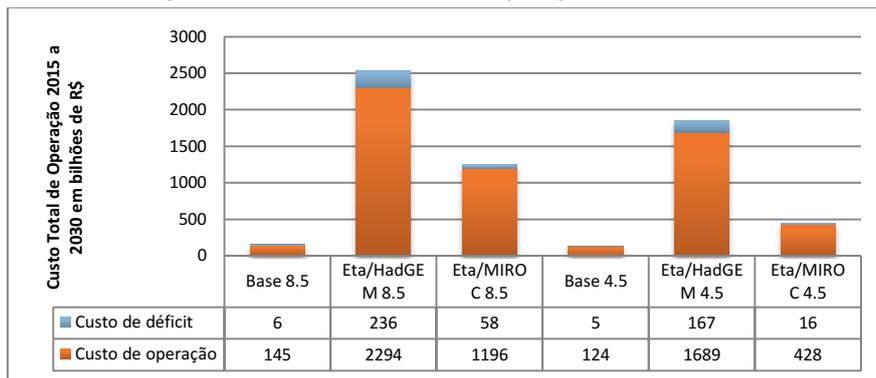
- RCP 8.5: Energia Natural Afluenta (ENA) média do SIN cerca de 10 a 30% (Eta/MIROC5 e Eta/HadGEM2-ES, respectivamente) menor que no caso das vazões geradas pelo histórico.
- RCP 4.5: Energia Natural Afluenta (ENA) média do SIN cerca de 7 a 25% menor que no caso das vazões geradas pelo histórico.
- Ambos os cenários apresentaram riscos de déficit elevados que são inaceitáveis pelo SIN<sup>13</sup>.

Figura 8.8 Cenários do setor de energia com mudanças climáticas



<sup>13</sup> O SIN considera riscos de déficit abaixo de 5% como aceitáveis.

Figura 8.9 Cenários com e sem mudanças climáticas: Custo Total de Operação 2015 a 2030 em bilhões de R\$.



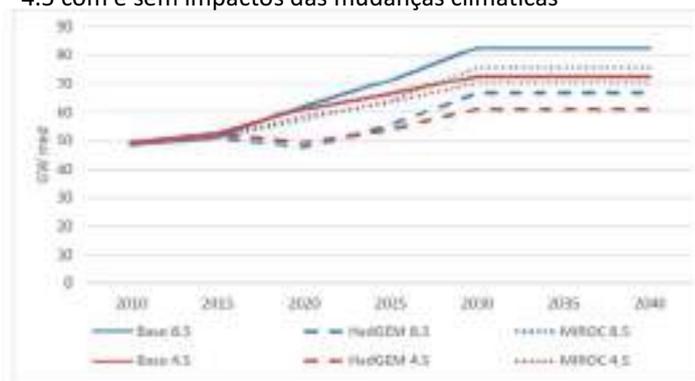
A Energia Natural Afluente (ENA) projetada pelos dois modelos seria reduzida. Com isso, observam-se CMOs elevados, ou seja, situação onde o sistema não consegue atender a demanda em grande parte dos cenários hidrológicos simulados, ocasionando cortes de carga (Figura 8.9). Contudo deve-se observar que os resultados produzidos com o modelo Eta/HadGEM2-ES indicaram uma majoração no impacto, a qual é fortemente influenciada por seu viés mais seco (ampliação do aumento da temperatura e redução da precipitação).

Em termos de operação, por sua vez, os resultados obtidos indicaram que, segundo os cenários hidrológicos utilizados, os impactos sobre a operação do SIN seriam enormes, levando a uma desestruturação do sistema e probabilidades de déficit inaceitáveis, muito acima dos 5% considerados atualmente na operação do SIN. No cenário de impactos mais amenos (Eta/MIROC5 4.5), o risco de déficit ficaria, em média, acima de 10%, alcançando 17% em alguns anos. No cenário extremo de impacto (Eta/HadGEM2-ES), a probabilidade de déficit chegaria a ficar acima de 90%. Isso não apenas geraria altos custos com déficits, mas também levaria a custos operacionais altíssimos (variando entre um aumento de 3,5 a 16,7 vezes com relação à linha de base, nos cenários de menor/maior impacto, respectivamente) na medida em que as usinas existentes teriam que trabalhar a plena capacidade durante todo o período de análise, elevando os custos com combustíveis.

## 8.4 Adaptação

Como foi destacado nos resultados acima, a queda na disponibilidade hídrica afetaria sobremaneira a geração hidrelétrica, impactando severamente a operação do SIN, refletida em um fator de capacidade menor para as usinas hidrelétricas (Figura 8.10). Isso significa que a mitigação de GEE, segundo esses modelos climáticos, geraria benefícios em termos de impactos menores e, consequentemente, custos evitados.

Figura 8.10 Geração hidroeétrica total nos cenários RCP 8.5 e 4.5 com e sem impactos das mudanças climáticas



Em função dessa perda para o sistema, propôs-se o portfólio de geração aumentando a capacidade de geração de outras fontes para compensar a menor disponibilidade hídrica, e permanece aumento nos cenários de impactos de mudanças climáticas (Figura 8.11 e Figura 8.12):

- No cenário RCP8.5, por não haver políticas de mitigação explícitas, adotou-se uma ótica de menor custo de geração de eletricidade de fontes fósseis, notavelmente de carvão e gás natural. Como pode-se notar, por ter impactos menores sobre a hidroeletricidade, o cenário Eta/MIROC5 8.5 necessitaria de menos geração adicional como adaptação, resultando em uma menor geração a carvão. Como consequência, haveria um aumento no consumo dessas fontes de energia primária e um aumento nas emissões de CO<sub>2</sub> da geração elétrica quando

# ENERGIA

considerados os impactos de mudanças climáticas. Com base na queda do fator de capacidade das hidroelétricas a geração de eletricidade passaria a ser, em média, cerca de 15% menor no cenário Eta/HadGEM2-ES e cerca de 4% menor no cenário Eta/MIROC5.

- No cenário RCP4.5, a política de mitigação simulada altera os resultados de adaptação em, basicamente, dois sentidos. Primeiramente, devido ao fato da demanda total do sistema ser menor por conta de políticas de eficiência energética agressivas, o esforço de mitigação se torna menor nesse cenário. Em segundo lugar, no momento em que uma política climática se faz presente através de uma taxa de carbono mais alta, as opções fósseis perdem a competitividade e deixam de ser as melhores alternativas para adaptação. Nesse cenário, as opções de mitigação mais custo efetivas são fontes renováveis, notavelmente energia eólica, biomassa e, em menor grau, solar. O gás natural também continua sendo uma opção de mitigação importante, em função do seu papel flexível na operação do sistema, que se torna ainda mais relevante frente a uma expansão forte de fontes intermitentes, como eólica e solar.

Figura 8.11 Alternativas de Adaptação Energia Elétrica

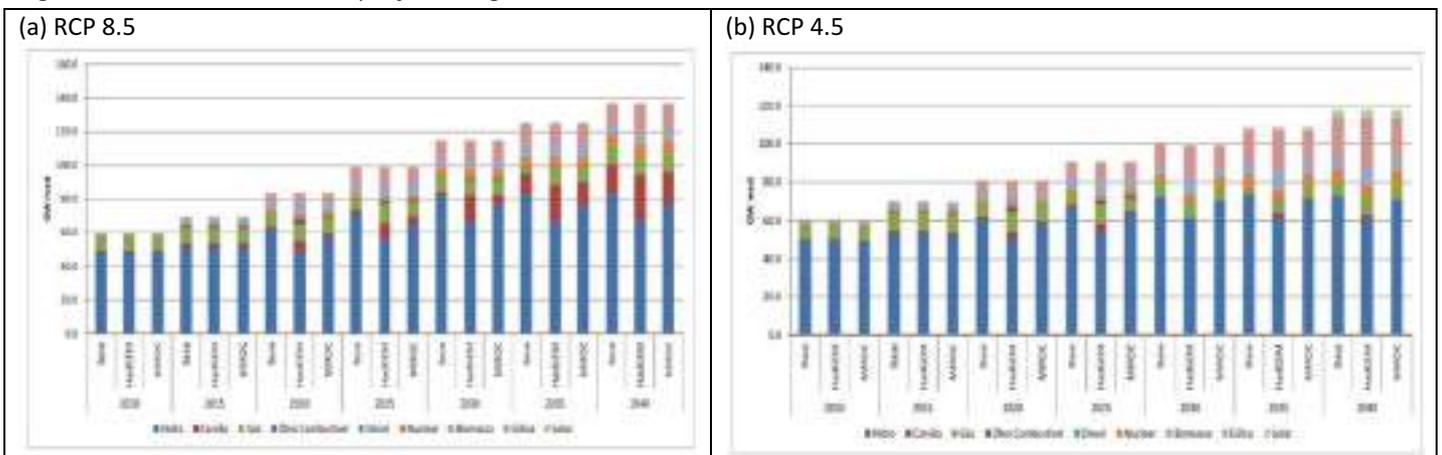
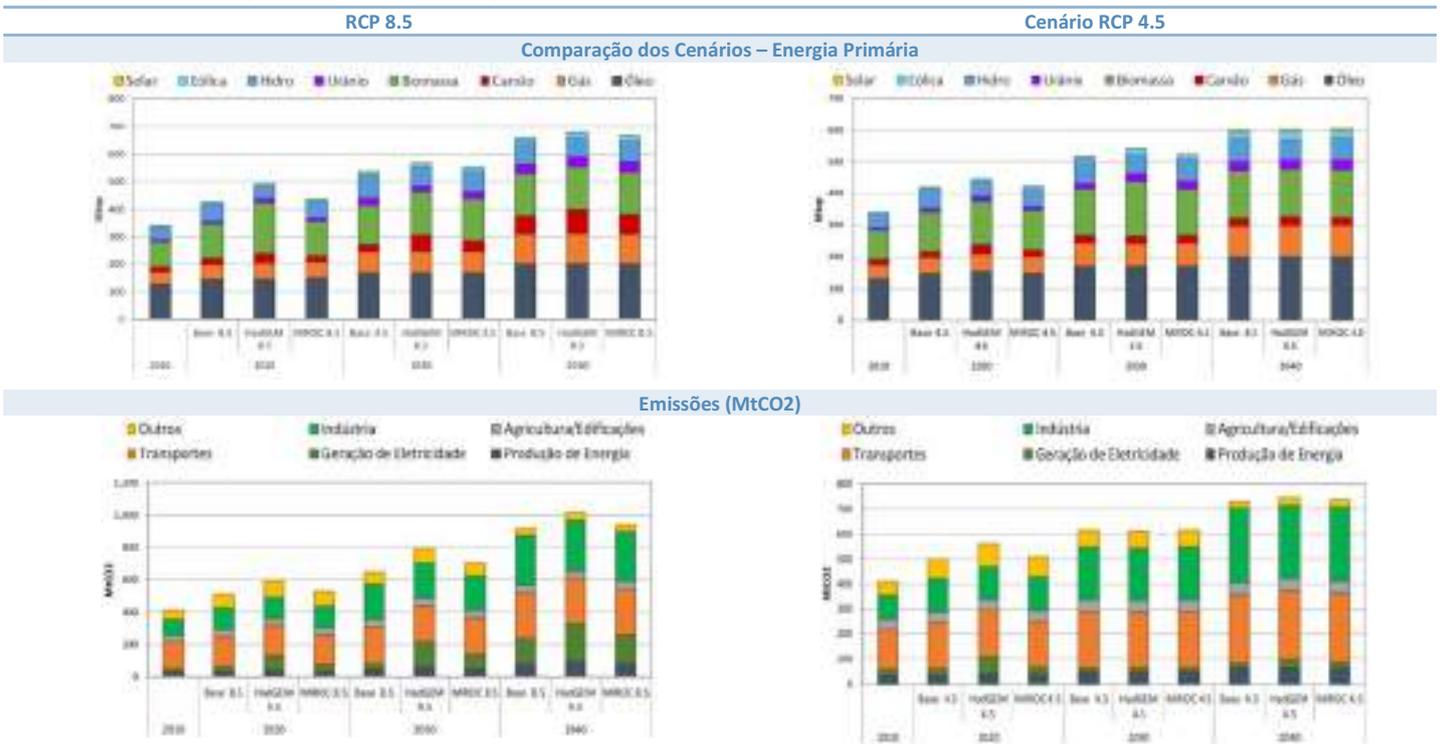


Figura 8.12 Comparação dos cenários: Energia primária e Emissões



Em verdade, o SIN trabalha atualmente através de uma ótica hidrotérmica, em que as usinas termelétricas atuam de forma variável, apenas compensando eventuais períodos de hidrologia desfavorável. Em função desse papel atribuído a elas, em geral as termelétricas costumam a ser usinas de menor custo de capital, porém com maiores custos operacionais e menor eficiência. A partir do momento em que, em um cenário de impactos climáticos, elas operam de forma ininterrupta, o custo de operação do sistema aumenta sobremaneira.

Nesse sentido, seria inevitável adaptar via expansão, visto que não é possível que o SIN trabalhe com um nível de risco tão alto. Ademais, os custos de investimento em expansão podem reduzir significativamente os custos de operação do sistema, uma vez que alternativas de menor custo são adotadas, conforme visto pela análise integrada.

Os resultados da análise integrada adaptação/mitigação mostraram que os custos de adaptação aos impactos severos projetados pelos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5 são significativamente menores no RCP 4.5. Nesse cenário, assumiu-se que medidas de mitigação seriam tomadas, na medida em que o Brasil acompanharia o esforço de mitigação internacional para estabilizar o forçamento radiativo em  $4.5 \text{ w/m}^2$  em 2100. Isso se deve, em maior grau, às premissas adotadas para o sistema energético compatível com um mundo RCP 4.5. Em especial, as premissas de redução de demanda via eficiência energética levaram os cenários RCP 4.5 a custos de adaptação, seja via operação ou via expansão, a atingir valores significativamente menores. O risco de déficit projetado para esse cenário foi também menor pelo mesmo motivo.

Observou-se que a internalização do custo de carbono teria um efeito importante sobre as alternativas de adaptação de menor custo via expansão do sistema. Cabe averiguar, entretanto, se uma alta penetração de fontes como eólica, biomassa e solar não gerariam problemas elétricos para a operação da rede, como controle de tensão e frequência, distorções harmônicas e flicker. Esta internalização, todavia, não elevaria os custos de adaptação nos cenários RCP 4.5 a níveis superiores aos do RCP 8.5. Novamente, o papel da eficiência energética aqui deve ser ressaltado. Em outras palavras, dada uma alta penetração de eficiência energética, a descarbonização via incorporação do custo do carbono no sistema energético não aumentaria o custo de adaptação quando comparado a um cenário de alta demanda e nenhuma preocupação com mitigação.

## 8.5 Incertezas

O potencial brasileiro total de eficiência elétrica em cenários de políticas, sejam com o foco no setor elétrico, ou em mudanças climáticas de forma geral, ainda é incerto. O potencial de penetração de tecnologias mais eficientes irá depender não apenas do crescimento econômico e populacional, mas também, por exemplo, da evolução de posse e uso de equipamentos nas edificações, de mudanças de equipamentos e processos nos setores industriais e, ainda, de uma eventual penetração da eletricidade como fonte de energia com um papel relevante no setor de transportes.

Outros pontos que podem ser incorporados às incertezas são as limitações do trabalho em função da metodologia adotada. Primeiramente, ressalta-se a dificuldade em definir a configuração do sistema energético brasileiro em um mundo equivalente a um RCP 4.5 sem que se tenha um modelo de avaliação integrada (Integrated Assessment Model – IAM, ver Capítulo Bases Conceituais). Outra limitação está no fato da modelagem energética estar sujeita às características técnicoeconômicas das tecnologias analisadas, que podem variar ao longo do tempo.

Por fim, a principal limitação está nos dados de entrada da modelagem energética, que são calculados a partir dos dados dos modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5. Como colocado ao longo do estudo, os modelos climáticos usados apresentaram, ambos, quedas na vazão aos reservatórios das hidroelétricas em um horizonte bastante próximo, como 2020. Essa grande quebra estrutural deve ser considerada com cuidado, visto que os impactos das mudanças climáticas não necessariamente se darão de forma abrupta e em um horizonte tão próximo.

Para isso, seria importante avaliar em estudos futuros, resultados de outros modelos climáticos que mostram resultados distintos dos aqui utilizados.

Independentemente da confirmação do cenário climático utilizado na análise de impactos das mudanças climáticas sobre o setor, por depender intrinsecamente de condições climáticas a geração hidroelétrica é vulnerável a alterações do clima. Portanto, a vulnerabilidade do sistema energético brasileiro às mudanças climáticas requer que se investiguem, desde já, alternativas de adaptação para que se possa atuar em tempo hábil, a despeito das incertezas a respeito dos cenários climáticos. Dessa forma, as políticas de adaptação devem ser tais que o sistema delas se beneficie mesmo que o cenário climático desfavorável não ocorra, na medida em que busquem diminuir a vulnerabilidade do sistema a flutuações do clima. Este estudo preenche parte dessa lacuna no conhecimento científico sobre o tema.

## Referências

Lucena, A.F.P, Szklo, A.S, Schaeffer R, Souza RR, Borba BSMC, Costa IVL, et al., 2009. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. *Energy Policy* 37, pp.879-89.

Moss, R.H. et al. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 463: 747-756. doi:10.1038/nature08823.

Schaeffer, R., Szklo, A. S., Lucena, A. F. P., Borba, B. S. M. C., Rathmann, R., Castelo Branco, D. A., Júnior, M. F. H., 2012. Estudo Sobre as Ameaças e as Oportunidades Relativas ao Problema das Mudanças Climáticas Globais Sobre o Setor de Petróleo e Gás e Proposição de Ações Por Parte da Petrobras para Lidar com o Risco Carbono. Relatório Executivo COPPE/PPE/UFRJ. Brasil.

# INFRAESTRUTURA COSTEIRA

## 9. INFRAESTRUTURA COSTEIRA

### 9.1 Objetivos do Estudo

O relatório sobre a Infraestrutura Costeira tem como objetivos: (a) o mapeamento da vulnerabilidade socioambiental da costa brasileira, a partir do desenvolvimento de um índice<sup>14</sup> compreensivo; e (b) a análise da exposição da infraestrutura portuária brasileira aos riscos climáticos, considerando cenários de elevação do nível do mar e regimes de onda associados.

Preliminarmente, o estudo seria aplicado aos municípios e portos de Fortaleza (CE), Recife (PE), Salvador (BA), Rio de Janeiro (RJ) e Santos (SP). No entanto, a inexistência de dados e/ou a baixa resolução dos mapas necessários, fez com que o índice só pudesse ser calculado para os municípios do Rio de Janeiro e Santos. Quanto aos portos, apenas o porto de Salvador não pôde ser analisado, por falta das informações requeridas pela metodologia adotada; em compensação, vários outros portos foram incluídos no estudo (listados na Metodologia de Análise da Infraestrutura Portuária, sob o item 9.3), permitindo uma amostra bem representativa do contexto nacional.

### 9.2 Índice de Vulnerabilidade Socioambiental da Costa Brasileira – IVSCB

#### Metodologia de Construção/Aplicação do IVSCB

As etapas metodológicas e a concepção do IVSCB estão indicadas nas Figuras 9.1 e 9.2.

Figura 9.1 Etapas metodológicas da construção do IVSCB

ETAPA	DESCRIÇÃO
1. CONCEPÇÃO DO ÍNDICE	Em termos dos aspectos a serem agregados (aspectos Físicos e Sociais)
2. SELEÇÃO DOS INDICADORES	Indicadores de aspectos Físicos e Sociais (conforme Figura 2)
3. SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS	Variáveis que constituem cada indicador (conforme Figura 2)
4. DEFINIÇÃO DAS TABELAS DE GRADAÇÃO	Para classificação da vulnerabilidade das variáveis (Muito Baixa, Baixa, Média, Alta, Muito Alta)
5. DEFINIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA NECESSÁRIOS	Elevação do terreno, carta geotécnica e geomorfológica, uso/cobertura do solo, séries históricas de precipitação, tendências de elevação do nível do mar, amplitude da maré, demografia, escolaridade e renda
6. COLETA E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS	a) Padronização das projeções cartográficas para projeções métricas, e classificação dos dados nos graus de vulnerabilidade propostos; b) transformação das cartas vetoriais em matriciais
7. CÁLCULO DO ÍNDICE IVSCB	Média ponderada dos indicadores (Conforme Equações 1 a 2)
8. ANÁLISE DOS RESULTADOS	De maneira a permitir a recomendação de medidas de ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

<sup>1</sup>Índice é um valor numérico que representa a correta interpretação da realidade de um sistema simples ou complexo (natural, econômico ou social), utilizando, em seu cálculo, bases científicas e métodos adequados; é considerado um nível superior da junção de um jogo de indicadores ou variáveis. Indicador é um parâmetro selecionado, considerado isoladamente ou em combinação com outros, para refletir as condições do sistema em análise (SICHE *et al.*, 2007).

# INFRAESTRUTURA COSTEIRA

Figura 9.2 Concepção do IVSCB: indicadores físicos e sociais e respectivas variáveis



O cálculo do IVSCB (etapa 7) é feito a partir do: (a) cálculo de vulnerabilidade para cada indicador, consistindo em uma média simples dos graus de vulnerabilidade das respectivas variáveis (Equação 9.1); e (b) cálculo da média ponderada das vulnerabilidades de todos os indicadores, para obtenção do valor do IVSCB (Equação 9.2).

$$V_i = (\sum_1^n v_i)/n \quad (\text{Eq. 9.1})$$

Onde,  $V_i$  é o valor de vulnerabilidade para o indicador  $i$ ;  $v_i$  é o valor da vulnerabilidade para cada variável do indicador  $i$ ; e  $n$  é a quantidade de variáveis no indicador  $i$ .

$$\text{IVSCB} = (\sum_1^n p_i \cdot V_i)/n \quad (\text{Eq. 9.2})$$

Onde, IVSCB é o Índice de Vulnerabilidade Socioambiental da Costa Brasileira;  $V_i$  é o valor de vulnerabilidade para o indicador  $i$ ;  $p_i$ <sup>15</sup> é o peso atribuído ao indicador  $i$ ; e  $n$  é a quantidade de indicadores.

## Resultados da Aplicação do IVSCB

Conforme já citado, em função da inexistência de informações e/ou da baixa resolução dos dados coletados para alguns dos municípios preliminarmente selecionados, o IVSCB foi aplicado apenas aos municípios do Rio de Janeiro (RJ) e Santos (SP). Foi considerada uma distribuição dos pesos  $p_i$  que valorizasse o indicador de Tipo de Ocupação/uso (que recebeu peso 0,22, enquanto os demais indicadores receberam peso 0,13). Para os dados de elevação de nível do mar foi atribuído um valor para cada cenário, de forma a indicar qual o aumento esperado, de acordo com as previsões do IPCC para o ano de 2040: (a) Cenário RCP4.5: elevação de 0,33m; (b) Cenário RCP8.5: elevação de 0,38 m.

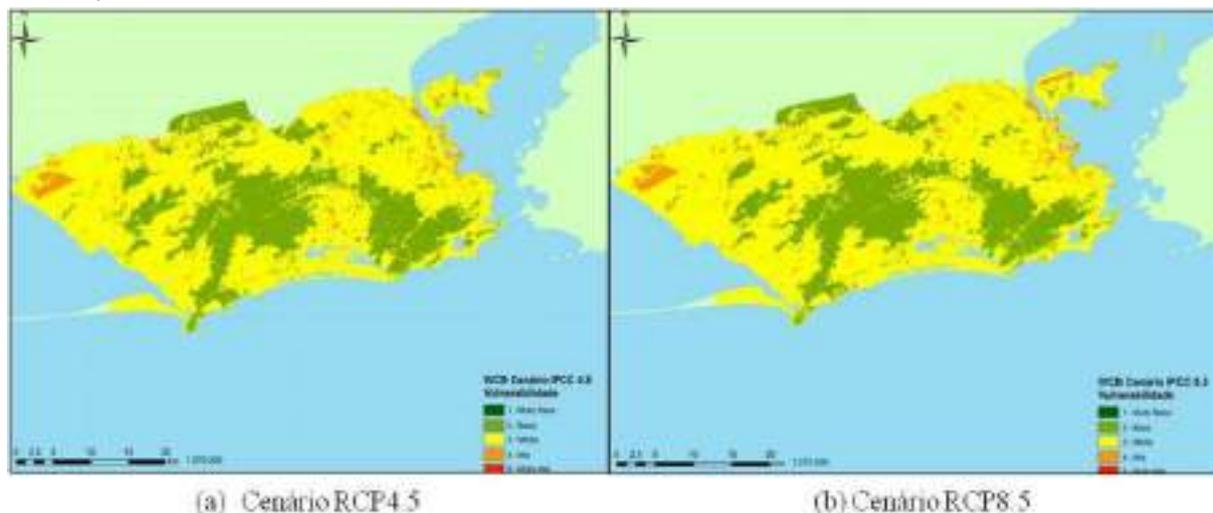
## Resultados do IVSCB para o município do Rio de Janeiro (RJ)

A Figura 9.3 (a, b) apresenta os resultados do cálculo do IVSCB para o município do Rio de Janeiro (RJ), respectivamente para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

<sup>15</sup> A atribuição dos pesos  $p_i$  para cada indicador  $i$  foi feita com base na técnica AHP (SAATY, 2008), segundo a qual uma matriz de prioridades é montada a partir da consulta a especialistas, a decisores e à literatura, para definir a importância relativa de cada indicador. A soma dos pesos  $p_i$  deve ser igual a 1.

# INFRAESTRUTURA COSTEIRA

Figura 9.3 IVSCB para o Rio de Janeiro, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5

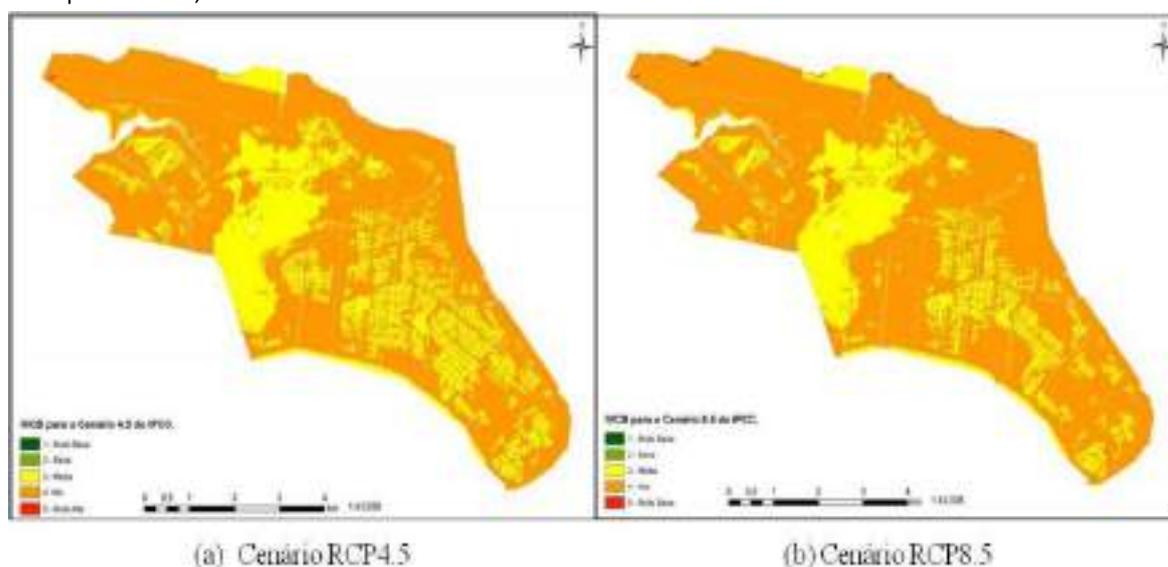


Verifica-se, em ambos os cenários, que não há áreas de vulnerabilidade muito alta (nível 5) no município. De modo geral, a infraestrutura do município encontra-se em regiões de média vulnerabilidade, porém alguns pontos importantes estão em áreas de alta vulnerabilidade, merecendo maior atenção: (a) grande parte das unidades de resposta a desastres naturais (instalações militares, policiais e de corpos de bombeiros, entre outras), podendo ter comprometido o seu funcionamento e diminuída a sua capacidade de resposta; (b) em sua maioria, os hospitais públicos, podendo haver dificuldade em acessá-los ou evacuá-los; (c) duas, das quatro estações de tratamento de água e esgoto, o que pode colocar em risco a saúde da população por elas atendida (falta de água potável, doenças de veiculação hídrica); (d) vários pontos das avenidas principais e secundárias da cidade, podendo comprometer a mobilidade da população e de órgãos de atendimento a desastres; (e) algumas estações ferroviárias e metroviárias, bem como a quase totalidade do percurso do VLT (Veículo Leve sobre Trilhos), de modo que a sobreposição de eventos associados às mudanças climáticas pode causar interrupções/paralisações desses serviços

## Resultados do IVSCB para o município de Santos (SP)

A Figura 9.4 (a, b) apresenta os resultados do cálculo do IVSCB para a região insular<sup>16</sup> do município de Santos (SP), respectivamente para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Figura 9.4 IVSCB para Santos, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5



<sup>16</sup> Na área insular encontra-se a maior parte da população do município, assim como a maior concentração de indústrias e armazéns ligados à atividade portuária, além do próprio Porto de Santos.

# INFRAESTRUTURA COSTEIRA

Verifica-se, em Santos, uma situação mais grave, em termos de vulnerabilidade às mudanças climáticas, do que no município do Rio de Janeiro, visto que a maior parte da área encontra-se em alta vulnerabilidade (nível 4), com diversos pontos em nível de vulnerabilidade muito alta (nível 5): (a) diversas unidades de resposta a desastres (instalações militares, policiais e corpo de bombeiros); (b) algumas escolas, ginásios e hospitais; (c) grande número de empreendimentos industriais e atividades químicas; (d) os dois terminais de transporte rodoviário coletivo, ambos na parte norte da ilha, próximo ao porto e à Via Anchieta (principal via de acesso rodoviário ao município). A dificuldade para realocar infraestrutura e atividades para áreas de menor vulnerabilidade (que praticamente não existem na região) aumenta a preocupação com necessidades de adaptação.

## Recomendações de Medidas de Adaptação para as Zonas Urbanas Costeiras

A Tabela 9.1 apresenta as recomendações de medidas de adaptação às mudanças climáticas, para os municípios do Rio de Janeiro e Santos, conforme resultados do IVSCB para os cenários utilizados (RCP4.5 e RCP8.5).

Tabela 9.1 Recomendações de medidas de adaptação para as zonas urbanas costeiras

Escala adaptativa	Rio de Janeiro (RJ)	Santos (SP)
Normas	Revisar o Código de <b>Obras</b> do município, para adaptação às mudanças climáticas, com base em estudos de vulnerabilidade.	Revisar o Código de <b>Habitação</b> , para adaptação às mudanças climáticas, com base em estudos de vulnerabilidade.
Planejamento	Revisão do Plano Diretor, Plano de Mobilidade Urbana e Zoneamento Municipal –, de forma a incorporar aspectos de vulnerabilidade às mudanças climáticas.	Análise do Plano Nacional de Mudanças Climáticas e suas interfaces com as municipalidades.
Políticas públicas	Discutir e encaminhar medidas específicas de adaptação junto a setores mais críticos, em especial o de infraestrutura de transportes.	Elaborar Plano Municipal de Mudanças Climáticas, abrangendo os principais elementos da infraestrutura urbana, em sua concepção.
'Prioridades	Conduzir estudos específicos de vulnerabilidade e risco, especialmente no que concerne à área portuária e à nova infraestrutura de transporte, a ser instalada em curto prazo (VLT).	Analisar, em detalhe, o mapeamento de vulnerabilidade, para validação pela sociedade, conscientizando-a da importância da temática e da adoção de uma agenda de adaptação.
	Analisar a necessidade e perfil de intervenção adaptativa para redução de danos decorrentes de eventos extremos, com foco em: (i) Localização e disponibilidade de hospitais públicos de grande escala, para pronto atendimento; (ii) infraestrutura viária nas áreas de vulnerabilidade apontadas; (iii) análises de risco, envolvendo o setor imobiliário.	Revisar, de imediato, o Código de Habitação do município, visando ampliar a resiliência das habitações e edificações na sua região insular (ex.: estacionamentos subterrâneos); e Elaborar estudos de vulnerabilidade e riscos, para setores específicos (ex.: áreas industriais e de sensibilidade logística) apontados no presente estudo.

## 9.3 Análise da Exposição das Infraestruturas Portuárias aos Riscos Climáticos

### Metodologia de Análise da Exposição das Infraestruturas Portuárias

As etapas metodológicas, para análise da exposição das infraestruturas portuárias aos riscos climáticos, estão

# INFRAESTRUTURA COSTEIRA

apresentadas na Figura 9.5.

Figura 9.5 Metodologia de análise da exposição da infraestrutura portuária

ETAPA	DESCRIÇÃO
1. DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DOS PORTOS	Disponibilidade de: (a) séries maregráficas (37 anos ou mais) e/ou estimativas de evolução de ondas (1960-1990); (b) informações cotas dos cais, granulometria e cotas de coroamento dos maciços de abrigo, para cada porto
2. SELEÇÃO DOS PORTOS	Em função da existência das informações necessárias (portos selecionados e base de análise indicados no texto)
3. DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA ANÁLISE	(a) Variações do nível do mar (com base nas séries de valores médios anuais de marés); (b) Interação vento-onda (utilizando modelos matemáticos de clima de ondas globais); (c) Clima marítimo
4. EXPOSIÇÃO E VULNERABILIDADE ATUAL	Análise geral da carteira portuária selecionada, em função das condições atuais de marés e ondas
5. EXPOSIÇÃO E VULNERABILIDADE FUTURA	Com base em: (a) Impactos de fatores climáticos (elevação do nível relativo do mar) e não climáticos; (b) Concepção de projeto e análise de risco; (c) Projeção e análise do risco de elevação da maré; (d) Projeção e análise de risco da variabilidade da onda de projeto
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	De maneira a permitir a recomendação de medidas de ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Na etapa 2, os portos selecionados, e respectiva base analítica, foram: (a) Belém (PA): maré; (b) Fortaleza (CE): onda; (c) Recife (PE): maré e onda; (d) Maceió (AL): maré; (e) Malhado (BA): onda; (f) Barra do Riacho (ES): onda; (g) Tubarão (ES): onda; (h) Praia Mole (ES): onda; (i) Rio de Janeiro (RJ): maré (1963-2009); (j) São Sebastião (SP): maré; (k) Santos (SP): maré; (l) Paranaguá (PR): maré; (m) Antonina (PR): maré; (n) Imbituba (SC): onda; (o) Laguna (SC): onda; (p) Rio Grande (RS): onda.

## **Exposição e vulnerabilidade atual das infraestruturas portuárias**

Os resultados da análise mostram que *as infraestruturas portuárias brasileiras já se encontram expostas a impactos*, decorrentes de fenômenos costeiros naturais, bem como de fenômenos climáticos ou não climáticos. Verifica-se que as bordas livres existentes estão abaixo do recomendável para os portos de Belém, Recife, Maceió, Niterói, Rio de Janeiro, São Sebastião, Santos e Paranaguá (para os quais foi possível analisar a elevação da maré), e que, dos portos analisados em relação às ondas (Fortaleza, Recife, Maceió, Malhado, Barra do Riacho, Tubarão, Praia Mole, Imbituba, Laguna e Rio Grande), apenas os de Barra do Riacho e Praia Mole não apresentam galgamento do cabeço.

## **Exposição e vulnerabilidade futura das infraestruturas portuárias**

A análise da vulnerabilidade futura das infraestruturas portuárias foi feita com base na projeção de fenômenos climáticos: elevação da maré e ondas<sup>17</sup> (altura e intensidade/frequência de eventos extremos de tempestades de ondas - *storm surges*).

<sup>17</sup> A partir das informações maregráficas de médias anuais (período 1950-1990), as tendências históricas de **elevação da maré** foram estimadas, estabelecendo-se as datas marco de 2015, 2030 e 2050 para projetar as elevações futuras com base na pretérita. A projeção da **variabilidade da onda de projeto** foi feita com base nos ajustes nas séries dos modelos de clima utilizados (WW3 e ERA-40); foram avaliadas as tendências quanto ao aumento das ondas em relação às ondas de projeto, informadas para os molhes e quebra-mares, para permitir a estimativa da faixa de dano nesses maciços, ao longo de sua vida útil, considerando os anos de 2015, 2030 e 2050 em relação a 1957. Além disso, considerou-se que as ondas extremas devem ter um crescimento de 10%, em média, por conta das mudanças climáticas, de modo a estimar os danos nos maciços de molhes e quebra-mares, especialmente em relação ao galgamento da coroa do cabeço.

# INFRAESTRUTURA COSTEIRA

As projeções de elevação da maré, para os anos de 2030 e 2050, implicam em maior redução das bordas livres dos cais dos portos mencionados acima (por exemplo, o porto de Recife, que apresenta borda livre de 0,97 m em 2015, teria esse valor reduzido para 0,87, em 2030, e 0,70, em 2050). Em relação ao galgamento do cabeço, apenas os portos de Barra do Riacho e Praia Mole continuam sem apresentá-lo, em 2030 e 2050. Além disso, a tendência média, até 2050, para todos os portos, é de: (a) aumento médio (33%) no aporte sólido do transporte litorâneo para os canais de acesso externos (assoreamento); (b) necessidade de aumento da largura dos canais de acesso externos, devido ao aumento do porte das embarcações e ao incremento na altura das ondas.

## **Recomendações de medidas de adaptação das infraestruturas portuárias**

As principais consequências dos fenômenos analisados são: o afogamento parcial de manguezais e marismas; a redução da borda livre do cais; a inundação de retroáreas portuárias e dos sistemas viários; a deterioração dos maciços das obras de defesa dos portos costeiros e estuarinos, como molhes, quebra-mares e molhes guias-correntes; o galgamento de maciços das obras de defesa dos portos costeiros; e o assoreamento dos canais de barra, ou canais externos.

Assim, são apresentadas sugestões de adaptação das instalações portuárias:

(1) *medidas de atuação imediata*: (a) gestão dos mangues (Recife, Maceió, Niterói, Rio de Janeiro e Santos); (b) reforço de armaduras de maciços de molhes e quebra-mares, com blocos artificiais (Fortaleza, Recife e Maceió); (c) alteamento dos maciços de molhes e quebra-mares (Fortaleza, Recife, Maceió, Malhado, Tubarão, Imbituba, Laguna e Rio Grande); (d) incremento anual da dragagem na barra (todos os portos, com exceção do porto de Santos);

(2) *medidas com conclusão até 2030*: (a) alteamento de paramento e microdrenagem de cais (Belém, Recife, Maceió, Niterói, Rio de Janeiro, São Sebastião, Santos, Paranaguá e Antonina); (b) macrodrenagem, sem *Storm Surge Barriers* (Belém, Maceió, Niterói, Rio de Janeiro, São Sebastião, Paranaguá e Antonina); (c) reforço de armaduras de maciços de molhes e quebra-mares, com blocos artificiais (Malhado, Barra do Riacho, Tubarão e Praia Mole);

(3) *medidas com conclusão até 2050*: (a) macrodrenagem, sem *Storm Surge Barriers* (Praia Mole); (b) macrodrenagem, com *Storm Surge Barriers* (Recife, Tubarão e Santos); (c) reforço de armaduras de maciços de molhes e quebra-mares, com blocos artificiais (Imbituba, Laguna e Rio Grande); (d) alteamento dos maciços de molhes e quebra-mares (Barra do Riacho e Praia Mole).

Comparativamente aos valores do PAC Portuário (R\$2,7 bilhões) previstos para o período 2007-2010, as estimativas de custos<sup>18</sup> das medidas sugeridas conduzem aos seguintes gastos (em valores de 2007): (a) *atuação imediata*: R\$13 milhões; (b) *de 2015 a 2030*: R\$1,665 bilhões; (c) *de 2030 a 2050*: R\$7,255 bilhões (incluindo 3 *Storm Surge Barriers*). Tendo em vista a importância do sistema portuário brasileiro para o desenvolvimento do país, bem como a contribuição em sinergia que estas obras podem oferecer para as Regiões Metropolitanas em seu entorno, consideram-se investimentos perfeitamente compatíveis com um escalonamento de 35 anos.

As recomendações de medidas de adaptação das infraestruturas portuárias foram feitas de acordo com uma escala adaptativa, considerando os seguintes aspectos: (1) *Normas*: estabelecimento de diretrizes na obtenção de níveis do mar e do clima de ondas para os diferentes tipos de obras portuárias; (2) *Planejamento*: em curto, médio e longo prazo (conforme a necessidade de conclusão das obras necessárias seja: imediata, até 2030 ou até 2050), para todos os portos marítimos (Planos Diretores Portuários); (3) *Políticas regulatórias*: alicerçadas, fundamentalmente, na subdivisão das componentes portuárias (estruturas de abrigo, estruturas de atracação, manutenção dos espaços náuticos (dragagem), instalações de armazenamento, sistema viário interno e sistema viário de acesso), devendo contemplar a especificação de exigências adicionais àquelas hoje em vigor; (4) *Prioridades nacionais*: as Regiões

<sup>18</sup> O custo de gestão dos mangues foi considerado como custo ambiental – que já deveria estar contemplado – referente à fiscalização em conjunto com os Municípios, para a preservação dos manguezais e sua ampliação, restringindo a ocupação por construções neste ambiente legalmente protegido.

Metropolitanas Portuárias devem ser priorizadas, por envolverem um grande contingente populacional e um alto conglomerado de atividades econômicas. A sinergia da adaptação a ser adotada para a infraestrutura portuária, em relação à gestão costeira e urbana, depende do planejamento a ser seguido pelas autoridades portuárias.

## 9.4 Incertezas

Em relação aos resultados do IVSCB, podem ser consideradas como fontes de incerteza: (a) a utilização de projeções fornecidas por modelos climáticos globais (elevação do nível médio do mar, dos cenários RCP4.5 e RCP8.5), e regional (número de chuvas consideradas extremas, do modelo ETA, aninhado nos modelos globais HadGem e Miroc5), que trouxe, para alguns indicadores, as incertezas inerentes a esses modelos; (b) a previsão de elevação do nível médio do mar, que considerou a linha de costa oficial como o nível altimétrico “zero”. Embora se considere que as escalas utilizadas pelo IVSCB sejam pouco sensíveis, há possibilidade de erro, em função da ausência de marco geodésico comum para os ambientes marinho e continental; (c) as simplificações feitas na classificação dos solos, em função dos mapas geotécnicos e geomorfológicos fornecidos, com reflexos diretos nos resultados dos indicadores (por exemplo, no caso do Rio de Janeiro, reconhece-se que, se existisse um mapa geomorfológico específico da região de praia, os resultados do Indicador de Erosão seriam mais contundentes sobre a real suscetibilidade da costa do Rio de Janeiro a processos de erosão costeira); (c) o cálculo do IVSCB, feito por meio da média ponderada entre os resultados de vulnerabilidade por indicador. A atribuição de classes de vulnerabilidade às variáveis dos diferentes indicadores, bem como a ponderação destes, foi feita com base na técnica AHP – *Analytic Hierarchy Process* (SAATY, 2008), segundo a qual uma matriz de prioridades é montada a partir da consulta a especialistas, a decisores e à literatura, para definir o nível de vulnerabilidade e a importância relativa de cada indicador. Embora essa técnica de análise multicriterial procure reduzir ao mínimo a subjetividade dos julgamentos, esta ainda existe.

Em relação à exposição e vulnerabilidade futura da infraestrutura portuária aos riscos climáticos, o grau de incerteza se torna menor, visto que a vulnerabilidade atual dos portos já é alta. Ainda assim, fontes de incerteza podem ser consideradas, tanto nas projeções de elevação da maré – baseadas no comportamento histórico e em projeções do Sistema de Modelagem Costeira (SMC Brasil) –, quanto na estimativa dos valores das alturas significativas de ondas (e dos acréscimos percentuais em relação ao ano de 1957), feita por extrapolação e com o uso de modelos numéricos de interação vento-onda (WAVEWATCH III (WW3) e ERA-40) os quais apresentaram diferenças nos seus resultados.

## Referências

SAATY, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, v. 1. N. 1. pp. 83-98.

SICHE, R.; AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E.; ROMEIRO, A. (2007). Índices versus Indicadores: Precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. *Ambiente & Sociedade*, v. X, n. 2. pp 137-148.