



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



**PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO**

PROJETO BRA/06/032

ENQUADRAMENTO PNUD: R.1 P1.17

Carta de Acordo nº 26715/2014 (RC) – SAE – COPPETEC

Adaptação às Mudanças do Clima: Cenários e Alternativas:

Infraestrutura de Transportes

Produto 2 – Definição das variáveis climáticas relevantes e definição dos *hotspots*

Responsável:

---

**Prof. Emilio Lèbre La Rovere**

Rio de Janeiro, 01 de junho de 2015

# Adaptação às Mudanças do Clima: Infraestrutura de Transporte

## PRODUTO 2

### DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS RELEVANTES E DEFINIÇÃO DOS HOTSPOTS

**INTERESSADOS:** Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República – SAE/PR  
Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD

**EXECUTOR:** CentroClima/LIMA/COPPE

Junho/2015





# **Adaptação às Mudanças do Clima: Infraestrutura de Transporte**

## **Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente**

### **Coordenação Geral:**

Emilio Lèbre La Rovere

### **Coordenação Técnica:**

Denise da Silva de Sousa

### **Equipe Técnica LIMA:**

Daniel Fontana Oberling

Giovannini Luigi

Heliana Vilela de Oliveira Silva

Vivien Green Short Baptista

### **Equipe Técnica IME:**

Adriano de Paula Fontainhas Bandeira

José Carlos Cesar Amorim

Renata Albergaria

Vânia Barcellos Gouvêa Campos

### **Apoio Administrativo:**

Carmen Brandão

Elza Ramos

Pedro Baeta

## SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO .....	8
INTRODUÇÃO .....	9
1. METODOLOGIA .....	15
2. REVISÃO DA LITERATURA INTERNACIONAL .....	16
3. DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS PARA O BRASIL .....	73
4. IDENTIFICACAO DOS <i>HOTSPOTS</i> CLIMATICOS .....	98
ANEXO I - ESTUDOS REALIZADOS NO CAMPO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SISTEMA DE TRANSPORTE .....	165
ANEXO II - CLIMATOLOGIA ATUAL DO BRASIL .....	170
ANEXO III – ANALISE DE TENDÊNCIA ANUAL PARA OS EXTREMOS CLIMÁTICOS TNn, RX1day e Temp7dias.....	176
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	189

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Representação das inter-relações dos componentes da metodologia .....	18
<b>Figura 2.</b>	Metodologia da Highways Agency.....	29
<b>Figura 3.</b>	Estrutura do projeto .....	40
<b>Figura 4.</b>	Caminho para o processamento de dados .....	41
<b>Figura 5.</b>	Método de Matriz de Risco.....	51
<b>Figura 6.</b>	Zonas climáticas do Brasil .....	82
<b>Figura 7.</b>	Média (A) e desvio padrão (B) da temperatura média diária do ar .....	84
<b>Figura 8.</b>	Média (A) e desvio padrão (B) da temperatura mínima diária do ar .....	84
<b>Figura 9.</b>	Média (A) e desvio padrão (B) da temperatura máxima diária do ar.....	85
<b>Figura 10.</b>	Média (A) e desvio padrão (B) da amplitude térmica do ar .....	86
<b>Figura 11.</b>	Média (A) e desvio padrão (B) da umidade relativa do ar .....	87
<b>Figura 12.</b>	Temperatura média compensada anual.....	89
<b>Figura 13.</b>	Precipitação acumulada anual.....	90
<b>Figura 14.</b>	Anomalias de temperatura (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5 .....	103
<b>Figura 15.</b>	Anomalias de temperatura (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5 .....	104
<b>Figura 16.</b>	Anomalias de temperatura (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 4.5 .....	105
<b>Figura 17.</b>	Anomalias de temperatura (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 8.5 .....	106
<b>Figura 18.</b>	Anomalias de precipitação (em mm) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5.....	107
<b>Figura 19.</b>	Anomalias de precipitação (em mm) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5.....	108
<b>Figura 20.</b>	Anomalias de precipitação (em mm) – Eta/MIROC5, RCP 4.5.....	109
<b>Figura 21.</b>	Anomalias de precipitação (em mm) – Eta/MIROC5, RCP 8.5.....	110
<b>Figura 22.</b>	Anomalias para TNn (em °C) - Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5 .....	113
<b>Figura 23.</b>	Anomalias para TNn (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5.....	114
<b>Figura 24.</b>	Anomalias para TNn (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 4.5.....	115

<b>Figura 25.</b>	Anomalias para TNn (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 8.5.....	116
<b>Figura 26.</b>	Anomalias para RX1day (em mm) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5 .....	117
<b>Figura 27.</b>	Anomalias para RX1day (em mm) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5. ....	118
<b>Figura 28.</b>	Anomalias para RX1day (em mm) – Eta/MIROC5, RCP 4.5.....	119
<b>Figura 29.</b>	Anomalias para RX1day (em mm) – Eta/MIROC5, RCP 8.5 .....	120
<b>Figura 30.</b>	Anomalias para Temp7dias (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5.....	121
<b>Figura 31.</b>	Anomalias para Temp7dias (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5.....	122
<b>Figura 32.</b>	Anomalias para Temp7dias (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 4.5.....	123
<b>Figura 33.</b>	Anomalias para Temp7dias (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 8.5.....	124
<b>Figura 34.</b>	TNn (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5. Período futuro: 2011-1040.....	127
<b>Figura 35.</b>	TNn (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5. Período futuro: 2011-1040.....	128
<b>Figura 36.</b>	TNn (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 4.5. Período futuro: 2011-1040.....	129
<b>Figura 37.</b>	TNn (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 8.5. Período futuro: 2011-1040.....	130
<b>Figura 38.</b>	RX1day (em mm) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5. Período futuro: 2011-1040 .....	131
<b>Figura 39.</b>	RX1day (em mm) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5. Período futuro: 2011-1040 .....	132
<b>Figura 40.</b>	RX1day (em mm) – Eta/MIROC5, RCP 4.5. Período futuro: 2011-1040 .....	133
<b>Figura 41.</b>	RX1day (em mm) – Eta/MIROC5, RCP 8.5. Período futuro: 2011-1040 .....	134
<b>Figura 42.</b>	Temp7dias (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5. Período futuro: 2011-1040.....	135
<b>Figura 43.</b>	Temp7dias (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5. Período futuro: 2011-1040.....	136
<b>Figura 44.</b>	Temp7dias (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 4.5. Período futuro: 2011-1040.....	137
<b>Figura 45.</b>	Temp7dias (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 8.5. Período futuro: 2011-1040.....	138
<b>Figura 46.</b>	<i>Hotspot</i> para Temp7dias – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5. Período futuro: 2011-1040 .....	145
<b>Figura 47.</b>	<i>Hotspot</i> para Temp7dias – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5. Período futuro: 2011-1040 .....	146
<b>Figura 48.</b>	<i>Hotspot</i> para Temp7dias – Eta/MIROC5, RCP 4.5. Período futuro: 2011-1040.....	147
<b>Figura 49.</b>	<i>Hotspot</i> para Temp7dias – Eta/MIROC5, RCP 8.5. Período futuro: 2011-1040.....	148
<b>Figura 50.</b>	Estações pluviométricas analisadas por Pfafstetter (1982).....	151

<b>Figura 51.</b>	<i>Hotspot</i> para RX1day – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5. Período futuro: 2011-1040 .....	155
<b>Figura 52.</b>	<i>Hotspot</i> para RX1day – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5. Período futuro: 2011-1040 .....	156
<b>Figura 53.</b>	<i>Hotspot</i> para RX1day – Eta/MIROC5, RCP 4.5. Período futuro: 2011-1040 .....	157
<b>Figura 54.</b>	<i>Hotspot</i> para RX1day – Eta/MIROC5, RCP 8.5. Período futuro: 2011-1040 .....	158
<b>Figura 55.</b>	Percentuais de <i>hotspots</i> de Temp7dias por zona climática, para os modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES (HG) e Eta/MIROC5 (MR) e cenários de emissão RCP 4.5 e 8.5 .....	159
<b>Figura 56.</b>	Percentuais de <i>hotspot</i> de RX1day por zona climática, para os modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES (HG) e Eta/MIROC5 (MR) e cenários de emissão RCP 4.5 e 8.5.....	160
<b>Figura 57.</b>	Percentuais dos <i>hotspots</i> de Temp7dias e RX1day com relação a área total do Brasil, para os modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES (HG) e Eta/MIROC5 (MR) e cenários de emissão RCP 4.5 e 8.5 .....	160
<b>Figura AIII.1</b>	Gráficos de tendência anual para TNn, usando estimativa de Sen, para o Eta/HadGEM2-ES, por zona climática. Fonte: Elaboração própria.....	176
<b>Figura AIII.2</b>	Gráficos de tendência anual para TNn, usando estimativa de Sen, para o Eta/MIROC5, por zona climática. Fonte: Elaboração própria.....	178
<b>Figura AIII.3</b>	Gráficos de tendência anual para RX1day, usando estimativa de Sen, para o Eta/HadGEM2-ES, por zona climática. Fonte: Elaboração própria.....	180
<b>Figura AIII.4</b>	Gráficos de tendência anual para RX1day, usando estimativa de Sen, para o Eta/MIROC5, por zona climática. Fonte: Elaboração própria.....	182
<b>Figura AIII.5</b>	Gráficos de tendência anual para Temp7dias, usando estimativa de Sen, para o Eta/HadGEM2-ES, por zona climática. Fonte: Elaboração própria.....	184
<b>Figura AIII.6</b>	Gráficos de tendência anual para Temp7dias, usando estimativa de Sen, para o Eta/MIROC5, por zona climática. Fonte: Elaboração própria .....	186



## ÍNDICE DE QUADROS

<b>Quadro 1.</b>	Impactos de eventos extremos em sistemas de transporte.....	11
<b>Quadro 2.</b>	Potenciais Efeitos das Mudanças Climáticas sobre a Rede de Rodovias Nacionais.....	55
<b>Quadro 3.</b>	Quadro síntese com as informações da revisão da literatura internacional .....	68
<b>Quadro 4.</b>	Dispositivos de drenagem mais adequados.....	74
<b>Quadro 5.</b>	Métodos de cálculo da vazão de projeto de dispositivos de drenagem rodoviária .....	75
<b>Quadro 6.</b>	Desagregação da intensidade pluviométrica diária .....	76
<b>Quadro 7.</b>	Relação entre as nomenclaturas adotadas no Brasil e o método SUPERPAVE Norte-Americano.....	80
<b>Quadro 8.</b>	Síntese das características e a área de abrangência dos climas zonais .....	81
<b>Quadro 9.</b>	Índices de extremos climáticos .....	100
<b>Quadro 10.</b>	Anomalias de temperatura (em °C) e precipitação (mm), para os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5, dos modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, por zona climática .....	102
<b>Quadro 11.</b>	Anomalias de extremos climáticos para os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5, modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, por zona climática .....	112
<b>Quadro 12.</b>	Valores de extremos climáticos para os modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, RCP 4.5 e RCP 8.5, por zona climática, período 2011-2040 .....	126
<b>Quadro 13.</b>	Referencial para o estabelecimento de tendências dos dados de clima .....	140
<b>Quadro 14.</b>	Temperatura máxima em conformidade com a latitude .....	143
<b>Quadro 15.</b>	Intervalos de intensidades pluviométricas .....	149
<b>Quadro 16.</b>	Tempos de recorrência recomendados para obras de drenagem em rodovias federais.....	150
<b>Quadro 17.</b>	Intensidade pluviométrica (em mm) projetada e estimadas por Pfafstetter (1982), para chuvas com tempo de recorrência de 5 anos.....	152

<b>Quadro 18.</b>	Síntese dos dados dos <i>hotspots</i> de Temp7dias e RX1day, por zona climática, para os modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES (HG) e Eta/MIROC5b (MR), cenários de emissão RCP 4.5 e 8.5 .....	161
<b>Quadro AIII.1.</b>	Tendência anual para TNn, usando estimativa de Sen, para o Eta/HadGEM2-ES, por zona climática.....	177
<b>Quadro AIII.2.</b>	Tendência anual para TNn, usando estimativa de Sen, para o Eta/MIROC5, por zona climática .....	179
<b>Quadro AIII.3.</b>	Tendência anual para RX1day, usando estimativa de Sen, para o Eta/HadGEM2-ES, por zona climática .....	181
<b>Quadro AIII.4.</b>	Tendência anual para RX1day, usando estimativa de Sen, para o Eta/MIROC5, por zona climática.....	183
<b>Quadro AIII.5.</b>	Tendência anual para Temp7dias, usando estimativa de Sen, para o Eta/HadGEM2-ES, por zona climática.....	185
<b>Quadro AIII.6.</b>	Tendência anual para Temp7dias, usando estimativa de Sen, para o Eta/MIROC5, por zona climática .....	187

## APRESENTAÇÃO

Este relatório apresenta o conteúdo do Produto 2 – Definição das Variáveis Climáticas Relevantes e Definição dos *Hotspots* – elaborado pela equipe técnica do Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente (LIMA), do Instituto Alberto Luís Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e do Instituto Militar de Engenharia (IME), conforme previstos nos Anexos I e III da Carta de Acordo N° 26.715/2014, firmada entre o Programa das Nações Unidas (PNUD), a Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (SAE/PR) e a Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos (Fundação COPPETEC).

A *Carta de Acordo* prevê o estabelecimento de parceria para a elaboração de pesquisas, condução de grupos de discussão e elaboração de subsídios técnicos em *Adaptação às Mudanças do Clima: Cenários e Alternativas – Infraestrutura de Transportes*.

No Item 1 é apresentada a metodologia geral para a identificação dos *hotspots* climáticos, considerando a revisão da literatura internacional sobre os impactos de eventos extremos em sistemas de transporte e definição das variáveis climáticas relevantes.

O item 2 apresenta uma revisão da literatura internacional, ou seja, o estado da arte envolvendo as mudanças climáticas e a infraestrutura de transportes a partir da seleção de estudos realizados nos Estados Unidos da América, Reino Unido, União Europeia, Austrália, França e Nova Zelândia, extraído dos mesmos os objetivos, a metodologia, as variáveis e indicadores climáticos, os potenciais impactos e as limitações.

No item 3 são apresentadas as variáveis e indicadores climáticos relevantes selecionados e breve caracterização do clima passado, atual e futuro do Brasil.

No item 4 são apresentados os resultados preliminares da espacialização dos *hotspots*, considerando os índices de extremos climáticos selecionados.

## INTRODUÇÃO

O quinto relatório (AR5) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (sigla em inglês, IPCC) destaca que as mudanças climáticas terão grande impacto atingindo populações em todo o mundo, com alterações nos diferentes sistemas, como o de infraestrutura, por exemplo, que abrange água e energia, saneamento e drenagem, transporte e telecomunicação; o ambiente construído e os serviços ecossistêmicos (IPCC, 2014a). Destaca-se, ainda, a necessidade de se compreender esses impactos e enfrentá-los, tendo em vista que serviços essenciais estão em constante risco frente a diferentes fatores, incluindo as mudanças climáticas.

Por outro lado, as nações, e principalmente os países em desenvolvimento, necessitam expandir seus diferentes setores produtivos, e ter avanços tecnológicos significativos. No entanto, ressalta-se a importância do aprimoramento das práticas utilizadas na atualidade, pois uma vez mantida a forma de expansão e exploração existente é possível projetar um aumento nos parâmetros de emissão de gases de efeito estufa (GEE) (Banco Mundial, 2010).

No que tange especificamente o sistema de transporte, é importante destacar a forte relação com as mudanças climáticas, em um processo de mão dupla: onde este sistema não só está interligado com os impactos sofridos e o processo de enfrentamento das mudanças climáticas, como, também, na contribuição para o progresso dessas mudanças em todo o mundo. Isso se deve ao fato de o sistema contribuir fortemente com emissões de gases de efeito estufa e poluentes ao longo dos anos (IPCC, 2007; IPCC, 2014a), sendo atualmente responsável por, aproximadamente, 23% do total de CO<sub>2</sub> emitido relacionado às atividades energéticas (IPCC, 2014a).

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.”*

Peterson *et al.* (2006) ainda destaca que as alterações moderadas no sistema climático atual não serão as mais impactantes para o setor de transporte. Assim, muitas vezes não são mudanças médias anuais ou sazonais as mais importantes, mas eventos extremos, relativamente curtos, que podem causar danos significativos à infraestrutura ou interromper as operações de transporte.

Além disso, é possível observar que diferentes alterações, em diferentes indicadores climáticos, geram diferentes consequências. O Comitê Técnico, da Associação Mundial de Estradas (*Technical Committee D.2 Road Pavements*, 2012), afirma que os eventos climáticos que afetam o pavimento de rodovias podem estar relacionados a:

- Mudanças climáticas primárias:
- Aumento da temperatura média;
- Aumento da temperatura máxima;
- Aumento/redução da precipitação;
- Aumento da ocorrência de eventos extremos de precipitação;
- Elevação do nível do mar;
- Elevação da velocidade do vento.
- Mudanças climáticas secundárias:
- Alterações da umidade do solo;
- Alterações no nível de águas subterrâneas;
- Modificações na vegetação;
- Alterações da época de construção.

Segundo o FHWA (2012) são exemplos dos tipos de alterações climáticas incluídos em avaliações de vulnerabilidade do setor de transporte as seguintes variáveis climáticas:

- Temperatura — Em rodovias, algumas alterações climáticas impactantes podem incluir o aumento do número de dias muito quentes, ondas de calor e mudanças na duração do período de construção.
- Eventos Extremos de Precipitação — Os modelos climáticos estabelecem que algumas regiões serão afetadas por chuvas mais intensas, enquanto outras sofrerão com

maiores períodos de seca. No entanto, espera-se que os impactos mais significativos no setor de transportes chegarão pela intensificação da ocorrência de eventos extremos de precipitação. Isto coloca em maior evidência os riscos de inundações de estradas, instalações de manutenção, e outros ativos. Algumas áreas poderão experimentar ciclos de seca prolongada seguidos por eventos extremos de precipitação que podem desestabilizar a vegetação ao longo de encostas e aumentar a probabilidade de deslizamentos.

- **Elevação do Nível do Mar** — Os modelos climáticos já alertam para a elevação do nível do mar e sua taxa de aumento deverá acelerar no próximo século. Isso pode acarretar maior risco de inundação (permanente ou periódica) de rodovias costeiras, bem como aumento da erosão costeira e dos níveis de águas subterrâneas. Durante tempestades, há riscos adicionais causados pelo aumento da altura da maré, em comparação aos dias de hoje. Além disso, tempestades costeiras podem intensificar-se no futuro.

O PBMC (2014) aponta que é possível observar vulnerabilidades em todo o processo de realização de obras de infraestrutura de transporte, nos diferentes segmentos – rodoviário, ferroviário, portuário e aeroportuário —, como, por exemplo, nos pavimentos, trilhos e fundações e nos ativos como túneis e pontes.

Essa afirmação é corroborada por inúmeros estudos desenvolvidos ao longo dos últimos cinco anos, como os realizados pela Comunidade Europeia, Nova Zelândia, Austrália, Reino Unido e Estados Unidos, relatados no item 1- Revisão da literatura internacional.

O Quadro 1 relaciona alguns impactos com a variável climática de interesse e o efeito esperado na infraestrutura rodoviária apresentados em estudos desenvolvidos em diferentes países.

**Quadro 1.** Impactos de eventos extremos em sistemas de transporte

Pais	Variável climática	Alteração Esperada	Efeito Esperado de Alteração da Variável Climática
Canadá	Temperatura	Elevação das temperaturas máximas e mínimas (principalmente no inverno).	Aumento da frequência dos ciclos de congelamento-descongelamento com deterioração do pavimento.
	Precipitação	Aumento de intensidade e frequência.	Aumento da presença de detritos na pista, deslizamentos de terra, inundações e alterações no dimensionamento de pontes e bueiros.
	Nível do mar	Elevação do nível médio.	Inundação e danos em rodovias, calçadas e instalações marítimas situadas em áreas baixas.

Pais	Variável climática	Alteração Esperada	Efeito Esperado de Alteração da Variável Climática
Holanda/Reino Unido	Precipitação	Aumento no inverno e redução no verão.	Risco de inundações e danos associados à capacidade insuficiente de drenagem.
	Nível do mar	Elevação do nível médio e a consequente elevação do nível das águas subterrâneas.	Inundação, problemas com material leve usado nas camadas de base ( <i>EPS – Expanded Polystyrene</i> ), contaminação pela lixiviação de cinzas utilizadas na sub-base.
Austrália	Temperatura	Elevação geral.	Alterações no clima, que ficando mais seco acarreta perda da qualidade dos ligantes asfálticos e redução da vida útil do material betuminoso
	Precipitação	Redução de intensidade e frequência.	

Fonte: Adaptado de *Technical Committee D.2 Road Pavements*, 2012

Alguns estudos (*Technical Committee D.2 Road Pavements*, 2012; FHWA, 2012) ainda destacam a preocupação com outros eventos, como a redução da cobertura de neve, aumento da velocidade de derretimento de neve e número de dias nevados, que não são preocupações para países tropicais como o Brasil.

Com esse panorama inicial pode-se dizer que o impacto potencial depende muito da zona climática onde a infraestrutura se situa e como a mudança climática irá se manifestar. No entanto, é possível observar que as duas principais variáveis climáticas que mais afetam o sistema rodoviário, foco deste estudo, são: precipitação e temperatura.

O estudo da *European Commission* (2012) relaciona à precipitação os seguintes impactos em rodovias:

- Inundações causadas pelas elevações das cotas dos rios;
- Inundações repentinas causadas por precipitações intensas de curta duração;
- Aumento da erosão em obras de arte especiais (principalmente pontes);
- Deslizamentos de terra.

Já associados à temperatura, o mesmo estudo europeu elenca os seguintes impactos:

- Problemas com o pavimento asfáltico;
- Dilatação de estruturas (sobretudo pontes em estrutura metálica).

Corroborando com a EC (2012), é possível citar também o estudo de Meyer (2008), onde o autor destaca que mudanças de temperatura podem afetar, de alguma forma, todos os componentes de projetos de infraestrutura, pois os materiais utilizados geralmente apresentam alguma contração e expansão, de forma a resistir a mudanças de temperatura, tanto altas quanto baixas, e o intervalo entre elas.

Além da temperatura e da precipitação, o estudo europeu mostra preocupação com a alteração na intensidade do vento, com a elevação do nível do mar, com modificações na frequência das tempestades de inverno, com a redução da cobertura de gelo no mar e com a redução do período de congelamento de cursos d'água.

Com relação aos ventos, ressalta-se que podem causar danos em estruturas rodoviárias, tais como: pontes, passarelas, rede de iluminação, placas e sinalização, cabeamento aéreo, estruturas altas em geral. Este pode ainda provocar desconforto no transporte realizado por veículos maiores, além de reduzir a segurança, provocando interrupção do tráfego. Caso a ocorrência de ventos fortes seja significativa, é importante verificar a resistência das estruturas à fadiga, e nos casos de aumento na intensidade, deve-se atentar para a própria integridade física da infraestrutura rodoviária.

Meyer (2008) e Soo Hoo & Sumitani (2005) *apud* PBMC (2014) destacam alguns componentes do sistema de transporte que, segundo suas análises, são mais vulneráveis às mudanças climáticas e eventos climáticos extremos:

- Pontes e bueiros – aumento da média anual e da intensidade de eventos de precipitação e aumento do nível do mar;
- Calçadas e estradas costeiras – aumento do nível do mar e aumento da frequência e intensidade de tempestades;
- Superfícies de pavimento – aumento médio da temperatura anual;
- Drenagem superficial – aumento da intensidade de eventos de precipitação;
- Estabilidade de encostas – aumento médio anual e da intensidade de eventos de precipitação.

Como observado por PBMC (2014), as projeções de mudanças climáticas relacionadas com mudanças no nível do mar, variações de temperatura e precipitação, além do aumento na ocorrência de eventos climáticos extremos (incluindo chuvas intensas) mostram um comprometimento negativo



da infraestrutura de transporte. As mudanças climáticas poderão afetar os sistemas de transporte (ferroviário, aéreo, rodoviário e hidroviário) em todos os países, impedindo potencialmente a mobilidade urbana, com consequência para o crescimento da economia e qualidade de vida das populações.

Além disso, em relação à questão emergencial quando da ocorrência de desastres naturais, há necessidade de se ter um sistema de transporte eficiente e confiável para evacuação da população e das vítimas em áreas afetadas.

Assim, é possível observar variações nos impactos das mudanças climáticas, tanto em relação ao sistema de transporte quanto às regiões afetadas e, também, no aumento dos custos, em termos humanos e econômicos, que irá exigir mudanças significativas no planejamento, desenho, construção, operação e manutenção do setor (PBMC, 2014). Ademais, é importante ressaltar que as mudanças devem englobar esforços de mitigação e adaptação, para reduzir as ameaças e aumentar a resiliência do sistema (Oswald & McNeil, 2012).

Em seu primeiro relatório, o Painel Brasileiro (PBMC 2014) aponta para a existência de lacunas na literatura nacional no que se refere a estudos sobre mudança climática e transporte, e para a necessidade de se desenvolver novos estudos e pesquisas que analisem os impactos, as vulnerabilidades e identifique as medidas de adaptação que possam subsidiar, de forma mais conclusiva, políticas públicas e estratégias de planejamento integradas com as políticas de desenvolvimento e de meio ambiente.

Nesse contexto, observa-se a importância do presente estudo para preencher parte dessa lacuna, uma vez que tem por objetivo agregar conhecimento sobre o impacto das mudanças do clima na infraestrutura do transporte rodoviário. No entanto, é importante ressaltar que frente às limitações encontradas para o seu desenvolvimento, a abordagem ficará restrita à análise dos padrões de construção, operação e manutenção de dispositivos de drenagem e pavimentos asfálticos do sistema rodoviário nacional.

Portanto, esta primeira iniciativa, além de agregar novo conhecimento ao setor, no que tange ao território nacional, ainda abre espaço para a ampliação da investigação sobre outros modais, ferroviário e aquaviário, assim como sobre outras variáveis climáticas, como ocorrência de ventos e elevação do nível do mar, e mesmo a ampliação a outros ativos no próprio sistema de transporte rodoviário, como pontes e túneis.

## 1. METODOLOGIA

Esta etapa do estudo centrou-se na identificação dos *hotspots* climáticos no Brasil, que dizem respeito a 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.

A metodologia para a identificação dos *hotspots* climáticos se deu seguindo os seguintes passos:

- Revisão da literatura internacional sobre os impactos de eventos extremos em sistemas de transporte

Foram levantadas informações sobre as metodologias comumente utilizadas, variáveis e indicadores climáticos, assim como os potenciais impactos de eventos climáticos diversos e as limitações encontradas no desenvolvimento de estudos realizados nos Estados Unidos, Reino Unido, Comunidade Europeia, Austrália, França e Nova Zelândia.

- Definição das variáveis climáticas

Com base na revisão da literatura e expertise da equipe, foram identificadas e selecionadas as variáveis climáticas relevantes para o estudo, 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.

Com relação aos dispositivos de drenagem, foi verificada se o desempenho será adequado às novas condições do clima futuro, considerando diferentes níveis de precipitação. Com relação aos pavimentos asfálticos, foram avaliados os limites de tolerância à temperatura do ar a partir dos quais podem ocorrer danos à integridade física do pavimento, comprometendo a sua funcionalidade e as condições de operação rodoviária.

- Identificação dos *hotspots* climáticos

As variáveis climáticas foram tratadas de forma a permitir a identificação de padrões espaciais de comportamento básico da atmosfera, com base no estudo de anomalias climáticas [diferença entre

o clima futuro (2011-2040) e o clima presente (1961-1990)], bem como de índices extremos climáticos, analisados sob o ponto de vista de anomalias e valores absolutos, para o clima futuro (2011-2040).

Foram utilizados os modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5 e respectivos cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5, desenvolvidos pelo CPTEC/INPE. Identificados os padrões espaciais do clima futuro, procedeu-se à análise de tendência anual para cada índice de extremo climático, considerando os períodos de integração presente e futuro dos cenários de emissão para ambos os modelos climáticos.

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 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 Pfeister (1982), considerando o tempo de recorrência de cinco anos, o mínimo utilizado para dimensionamento de estruturas de microdrenagem.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA INTERNACIONAL

Este item traz uma revisão da literatura internacional do estado da arte das mudanças climáticas e a infraestrutura rodoviária, abrangendo alguns estudos de destaque no cenário mundial, selecionados devido à grande importância metodológica e seu pioneirismo. O objetivo deste levantamento foi a obtenção de informações relevantes para o embasamento do estudo nacional, como a metodologia utilizada em cada caso; as variáveis e indicadores climáticos identificados como pertinentes; os potenciais impactos das mudanças climáticas em cada situação; assim como as limitações encontradas pelos autores para o seu desenvolvimento. O primeiro estudo, dos Estados Unidos da América, traz um apanhado de projetos pilotos – realizados em 5 diferentes estados norte-americanos – que replicam uma metodologia anteriormente desenvolvida pela *FHWA Office of Environment, Planning and Realty*, para a avaliação das vulnerabilidades e riscos à infraestrutura de transporte rodoviário.

O segundo, realizado pelo Reino Unido, apresenta uma metodologia baseada na análise de risco aplicada às mudanças climáticas nos transportes rodoviários. São englobadas as análises de construção, operação, manutenção e melhorias da rede do sistema.

A Comunidade Europeia, por sua vez, desenvolveu um estudo avaliando a vulnerabilidade dos transportes às mudanças climáticas, com foco na infraestrutura rodoviária e ferroviária. O estudo ainda se expandiu fazendo uma análise de medidas de adaptação.

Ainda, foi analisado o estudo realizado pela Austrália onde o custo de manutenção e o tempo de deterioração do pavimento das estradas nacionais são analisados frente às mudanças climáticas projetadas. Foi realizado com o intuito de demonstrar para diferentes atores como a compreensão sobre os impactos das mudanças climáticas, de forma prévia, pode colaborar para uma economia nos custos de infraestruturas rodoviárias em longo prazo.

Já o estudo realizado pela França analisa os riscos impostos pelas mudanças climáticas a diferentes modais de transporte francês – terrestre, ferroviário, aeroviário e aquaviário. Ademais, procura preencher grande lacuna neste campo no país.

Por fim, foi selecionado o estudo neozelandês, que se subdivide em dois produtos, e tem, também, como objetivo a identificação dos impactos das mudanças climáticas nas redes de transporte terrestre, agregando recomendações para o setor, trazendo informações sobre adaptação e suprimindo lacunas existentes.

Também, foram revisados outros estudos, elencados no Anexo I do presente relatório, que serviram como base para o desenvolvimento da metodologia da equipe LIMA/COPPE/UFRJ. Foram extraídas as informações de variáveis e indicadores climáticos e os potenciais impactos encontrados para cada um dos estudos.

## **2.1. Estados Unidos – *The Federal Highway Administration’s Climate Change and Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework (FHWA, 2012)***

### **2.1.1. Objetivo**

A *Federal Highway Administration* (FHWA) tem como principal iniciativa de adaptação às mudanças climáticas o desenvolvimento de uma metodologia própria de avaliação das vulnerabilidades e riscos à infraestrutura de transporte rodoviário, que seja aplicável em seu contexto institucional. A metodologia proposta foi resultado de um projeto piloto capitaneado pelo *FHWA Office of Environment, Planning and Realty*, pelo *Office of Infrastructure*, financiado pelo *State Department of Transportation* (DOT) e pela *Metropolitan Planning Organizations* (MPOs), realizado no biênio 2010-2011.

Sua aplicação ocorreu em cinco regiões – *New Jersey, Oahu, San Francisco, Virginia e Washington State* – e as lições aprendidas serviram para retroalimentar o modelo apresentado no trabalho FHWA (2012), que terão seus principais pontos resumidamente aqui apresentados.

### 2.1.2. Metodologia

A metodologia tem três componentes integrados e que sustentam todo o seu desenvolvimento: (i) definição do escopo e dos objetivos da análise; (ii) avaliação da vulnerabilidade; e (iii) integração dos resultados à tomada de decisão. A Figura 1 apresenta, esquematicamente, a relação entre os três componentes.

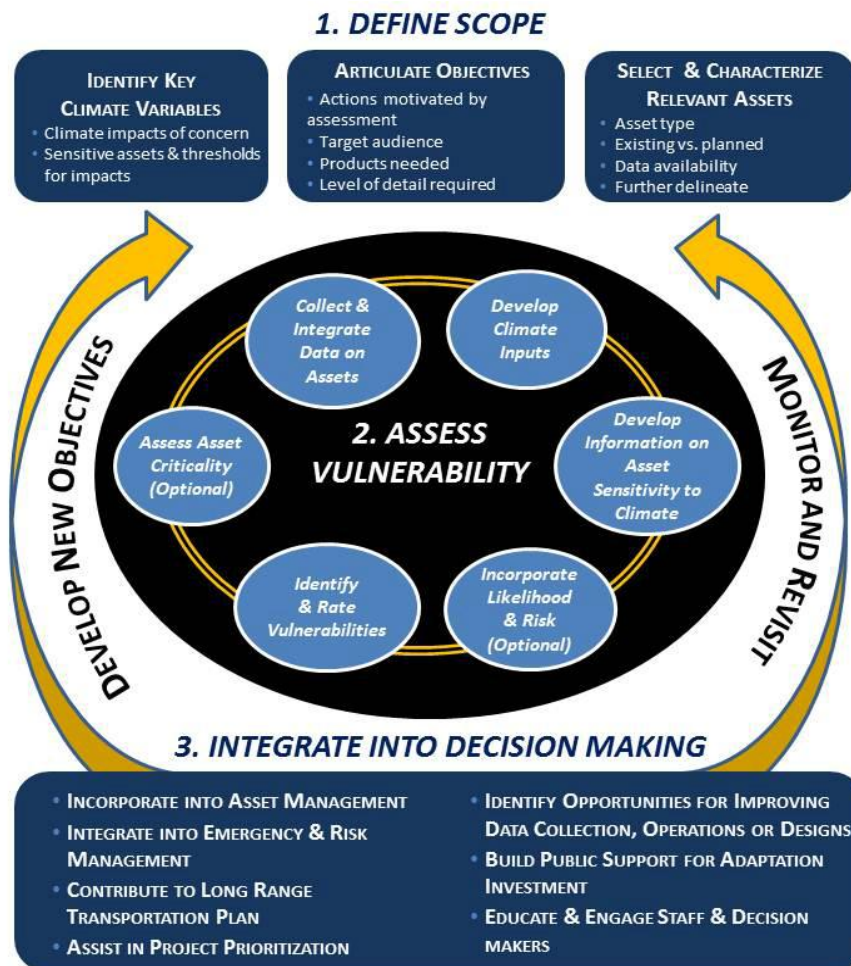


Figura 1. Representação das inter-relações dos componentes da metodologia

Fonte: FHWA (2012)

- Componente 1: Definição dos objetivos e do escopo

A definição dos objetivos é feita com base em perguntas orientadoras, que se propõem a identificar metas e consideram as expectativas de resultados do público alvo envolvido, ou seja, os tomadores de decisão. Os autores sugerem cinco questões, mas não esgotam a inclusão de outras: (i) que tipo de ações pode ser estimulado pela avaliação; (ii) qual o público alvo; (iii) quais produtos são necessários; (iv) quem os utilizará; e (v) qual o nível de detalhamento necessário.

São definidos, também, os ativos alvos da análise de vulnerabilidade e as variáveis climáticas utilizadas. Definem, dessa forma, os limites da avaliação, racionalizando a coleta de dados e excluindo as análises que não são relevantes.

- Seleção da infraestrutura relevante

Segundo o estudo, é estritamente necessário priorizar quais infraestruturas priorizar na análise, o que pode ajudar a reduzir o escopo. Uma avaliação que queira focar um grupo específico de estradas (p.ex. estradas sob o domínio federal), com base na avaliação de prioridades (jurisdição, geografia, representatividade, desempenho histórico e grau de criticidade) precisa decidir quais variáveis incluir e avaliar a disponibilidade de dados, o horizonte de planejamento e outras importantes características de gestão. A compilação de informações auxilia na avaliação da resiliência dos ativos, nos custos de manutenção e no impacto econômico com a redução dos serviços. Além disso, a metodologia recomenda que se definam, *a priori*, os ativos que serão avaliados (p.ex. obras de arte, rotas de evacuação, bueiros, caixas de drenagem, sistemas de controle de tráfego) e a escala temporal de análise.

Foi identificada como grande restrição a disponibilidade de dados e informações, que dificilmente são encontrados em uma única agência governamental, necessitando de grande esforço de pesquisa e adequação. Apresenta um *checklist* direcionador das informações que podem ser importantes, tais como: idade do ativo, localização geográfica, elevação, desempenho atual e histórico, nível de uso, custo de reposição, custo de manutenção, *design* estrutural, material utilizado, mapas de inundação, vegetação e uso do solo na zona lindeira.

Sugerem a utilização de ferramentas que determinem o nível de criticidade do ativo, como forma de selecionar os mais importantes e que serão foco da avaliação de vulnerabilidade. Reconhecendo a grande diversidade de ferramentas, foram sugeridas duas abordagens: (i) *desk review*, onde são definidos critérios de importância do ativo frente ao sistema de transportes, criando

um *ranking* com base em dados de sua utilização (p. ex., tráfego diário), classificação funcional ou julgamento de *experts*; (ii) *stakeholder input*, onde a criticidade é identificada com base em atores escolhidos em função dos seus interesses e conhecimento técnico sobre o assunto. Esses métodos podem ser utilizados de maneira combinada.

Ainda no que tange à avaliação de criticidade dos ativos, destacam as diferentes abordagens dos estudos piloto. No estudo referenciado em NJTPA (2012), a avaliação foi desenvolvida com base em rebatimento territorial. Avaliaram a criticidade em relação aos usos das rodovias, considerando o número de empregos nas regiões territorialmente contíguas, densidade populacional e média anual do tráfego diário, levando em consideração o conhecimento acumulado das agências oficiais.

Já no trabalho piloto realizado por WSDOT (2011) utilizaram, predominantemente, a opinião de especialistas. Foram organizados *workshops* em diversas regiões envolvendo especialistas locais. Associando valores de 1 a 10 (do menor para o maior risco), os especialistas eram orientados a classificar os ativos com base no conhecimento acumulado.

- Identificação das variáveis climáticas

A definição precisa e antecipada das variáveis climáticas é o próximo passo, prévio à análise de vulnerabilidade. Como não são todas as alterações climáticas futuras que oferecem riscos à infraestrutura rodoviária, local e regional, limitar as variáveis permite melhor projeção do que realmente interessa. A escolha dependerá dos objetivos do estudo e da interpretação dos atores setoriais sobre os acontecimentos climáticos do passado e influências futuras nos ativos.

No setor de transportes rodoviários, segundo os autores, as mudanças mais importantes não estão relacionadas às anomalias climáticas (alterações nas médias), mas às alterações na duração e na ocorrência de eventos extremos, que possam danificar os ativos, interrompendo ou não o seu uso. O trabalho cita cinco variáveis climáticas: (i) temperatura – crescimento do número de dias extremamente quentes, ondas de calor, mudanças no ciclo de derretimento do gelo, alterações no período de construções; (ii) chuvas extremas – aumento da ocorrência; (iii) aumento do nível do mar – maiores taxas de inundação da infraestrutura litorânea; (iv) derretimento do *permafrost*, afetando infraestrutura de transporte construída nessas áreas; e (v) hidrologia das áreas com gelo – mudanças nos ciclos das estações e alterações para um modelo com mais chuvas.

A interpretação de especialistas do setor sobre os acontecimentos climáticos extremos do passado ajuda a entender a sensibilidade dos sistemas, auxiliando na avaliação dos impactos. A metodologia recomenda investigar os seguintes pontos: (i) eventos climáticos que ocasionaram

rupturas no sistema; (ii) ativos que atualmente são afetados por eventos climáticos extremos; (iii) danos em obras-de-arte das estradas; (iv) limiar a partir do qual as infraestruturas começam a sofrer os impactos de eventos climáticos; e (v) locais já sistematicamente impactados por eventos climáticos. Os estudos-piloto ofereceram uma série de exemplos de indicadores climáticos que podem ser utilizados, cujos principais serão listados posteriormente.

- **Componente 2: Avaliação de Vulnerabilidade**

Com objetivo e escopo definidos e as variáveis climáticas selecionadas, o próximo passo é a avaliação da vulnerabilidade. A forma, o detalhamento e o nível de esforço variam em função das etapas anteriores. Um objetivo comum, independentemente do nível de detalhamento, é determinar como as alterações climáticas impactarão a infraestrutura de transporte e como essas informações podem ser integradas ao processo de tomada de decisão setorial.

A metodologia considera que a vulnerabilidade é uma função da sensibilidade do sistema de transportes aos eventos climáticos, da exposição aos eventos e da capacidade de adaptação.

As análises podem ser feitas por uma combinação de métodos quantitativos e qualitativos. Os métodos quantitativos podem envolver informações georreferenciadas ou modelos matemáticos e os qualitativos podem usar o conhecimento das vulnerabilidades locais pelos *experts* ou outros atores. A escala temporal e geográfica, os objetivos e os recursos financeiros variam em função dos métodos.

Antes de proceder com a análise propriamente dita, é recomendável escolher quais os indicadores climáticos serão utilizados por cada variável climática. O estudo deu destaque a indicadores de temperatura, precipitação e elevação do nível do mar.

Para temperatura e precipitação, os autores destacam que informações sobre grandes tendências são suficientes para atender questões mais amplas do planejamento setorial. Já perguntas específicas, especialmente quando investigados ativos ou determinadas áreas com escalas mais detalhadas, são preferíveis a informações oriundas de *downscale* de modelos.

Para o aumento do nível do mar é necessário o levantamento de informações para inundações, projeção de cenários de elevação do nível do mar e de tempestades, e sobreposição das camadas dos cenários com a de elevação do terreno e zonas costeiras, para identificar as áreas de inundação.

Para os efeitos de tempestades recomendam a utilização de alguns modelos específicos, que permitam o mapeamento das áreas expostas a eventos passados, tendo como base dados de estações de monitoramento de regiões hidrográficas, combinado com os valores de aumento do nível do mar.



As conclusões dessas análises não podem servir como uma "previsão" de como a paisagem futura irá se comportar e, portanto, capturar todas as vulnerabilidades enfrentadas em um local particular. Em geral, esse mapeamento não é indicado para a identificação de áreas de risco em escalas espaciais mais amplas (p. ex., regional ou nacional) ou para comunicar os riscos para o público em geral. No entanto, podem ser importantes para o planejamento do uso do solo local.

- Identificação e classificação das vulnerabilidades potenciais

Nesta etapa, os autores classificam as formas de se identificar as potenciais vulnerabilidades em duas abordagens, semelhantes às anteriores: (i) *desk review*, com auxílio de tabelas e mapas já elaborados; e (ii) *stakeholder input*. Na primeira, as informações sobre os ativos são combinadas com as projeções climáticas, com base em mapas ou outra estrutura analítica, permitindo a identificação de vulnerabilidades. Para isso, as projeções climáticas possuem representação territorial que, cruzadas com informações sobre os ativos, apresentam áreas de potencial vulnerabilidade. Na abordagem participativa, de consulta aos especialistas, as áreas vulneráveis são identificadas com base no conhecimento acumulado dos especialistas, quando confrontados com os cenários climáticos.

A análise de vulnerabilidade fomenta a priorização de ações na direção de melhorar a capacidade adaptativa dos sistemas de transporte. Para tal, a última etapa é a determinação da capacidade adaptativa, onde se busca entender como o sistema de transporte se ajusta às alterações climáticas, de forma a diminuir os potenciais danos e fortalecer as oportunidades. Um critério é a identificação de redundância em rotas ou modais de transportes e a facilidade do reestabelecimento das condições de tráfego por conta de um evento climático extremo.

A investigação da capacidade adaptativa é feita com base em perguntas norteadoras, como: o sistema já é habilitado para lidar com alterações no clima? Há alguma barreira no sistema para lidar com as mudanças? O sistema já está sob pressão de modo que comprometa a sua capacidade de lidar com alterações? Há previsão de que tais mudanças no clima podem acontecer mais rapidamente do que a adaptação dos sistemas? Já existem avaliações dos potenciais impactos das mudanças climáticas no sistema?

Por fim, a análise de risco é uma etapa opcional que depende da disponibilidade de informações. Tem como objetivo determinar o quanto a infraestrutura pode ser afetada pelas mudanças climáticas, associando uma determinada probabilidade de ocorrência dos eventos a diferentes magnitudes de efeitos. Recomendam a adoção da matriz de risco, com classificações qualitativas das faixas de risco (probabilidade de ocorrência x magnitude das consequências). Os

autores destacam que associar determinado risco a eventos climáticos futuros é impreciso sendo que, por vezes, não é recomendável aplicar determinada probabilidade à ocorrência de um evento.

- Componente 3: Integrando Vulnerabilidade à Tomada de decisão.

A última componente da metodologia consiste em integrar os resultados da avaliação à tomada de decisão, garantindo que seja realmente útil. A escolha natural são os ativos com maior exposição e maiores consequências de sofrer danos com eventos climáticos. Nesses casos, recomendam realizar detalhada análise custo-benefício das ações de adaptação, dentre as quais citam: construção de novos ativos mais resistentes aos eventos climáticos (anomalias ou extremos); readequação dos existentes; ciclos mais curtos de manutenção periódica; alterações no sistema de planejamento do setor; e melhorias nos planos de atendimento a emergências ambientais. Destacam, ainda, a necessidade de que as medidas sejam avaliadas sob o ponto de vista da viabilidade econômica, eficácia e capacidade de resistir aos eventos climáticos, o que pode preconizar mudanças nos padrões construtivos.

Por fim, é dado destaque à necessidade de métodos apropriados para a participação dos atores sociais interessados e para a divulgação dos resultados das análises. A não aceitação dos resultados pode inviabilizar a implantação das ações.

### **2.1.3. Variáveis e Indicadores Climáticos**

Dos estudos-piloto podem-se retirar as seguintes variáveis:

*Mudança na precipitação:*

- Precipitação média anual, mensal e sazonal
- Taxa de ocorrência média anual de chuvas que excedam 1", 2" e 4" por dia;
- Total de precipitação em 2 e 4 dias que ultrapassem as probabilidades das ocorrências médias atuais;
- Máximo de precipitação acumulada em cinco dias.

*Eventos extremos – chuvas:*

- Probabilidade de precipitações acima da média para 24 horas, segundo as probabilidades de 0,2, 1%, 2%, 5, 10, 20, e 50 % de eventos extremos (p.ex. 1/500 anos, 1/100, 1/50);

- Probabilidade de chuvas (24 h) que ultrapassem os eventos de ocorrência 0,2, 1, 2, 5, 10, 20, e 50 % nos valores atuais;
- Probabilidade de chuvas (4 dias consecutivos) que ultrapassem os eventos de ocorrência 0,2, 1, 2, 5, 10, 20, e 50 % nos valores atuais. O mesmo para chuvas de 2 dias;
- Maiores precipitações de 3 dias para cada estação do clima.

#### *Temperaturas:*

- Temperaturas mínimas, máximas e médias anual, mensal e sazonal;
- Máxima temperatura do ar em intervalos de 7 dias;
- Temperaturas máximas diárias: médias, 50 %, 95 %, dias mais quentes do ano durante cada período de 30 anos;
- Número de dias por ano com altas temperaturas;
- Número máximo de dias consecutivos com temperaturas acima de 35, 37,7, 40,5 e 43,3 °C;
- Média, 5, 25, 50, 75 e 95 % e *outliers* de temperaturas mínimas em mais de 4 dias no inverno e a média de temperaturas máximas diárias em mais de 4 dias seguidos no verão;
- Média, 50, 90, 95 e 99 % de ocorrência de dias mais frios em um ano durante o período de 30 anos;
- Média de 7 dias de temperatura máxima por ano, com probabilidade de ocorrência durante cada período de 30 anos (média, 50, 90, 95 e 99 %);
- Aumento potencial do nível do mar de 2, 4 e 6 pés.

#### **2.1.4. Potenciais Impactos**

A seguir, serão apresentados os principais efeitos climáticos e os respectivos impactos potenciais nas fases de planejamento, construção, operação e manutenção do sistema rodoviário listados nos estudos:

Efeito Climático: aumento na frequência de dias muito quentes e ondas de calor (temperaturas altas mais elevadas, aumento da duração das ondas de calor).

*Impacto potencial:*

- Aumento da expansão térmica das juntas de dilatação de pontes e superfícies pavimentadas, causando possível degradação;
- Aumento da expansão
- Preocupações quanto à integridade do pavimento e migração de asfalto líquido, aumentando a necessidade de manutenção;
- Limitação dos períodos de atividade de construção e maior sobrecarga de trabalho noturno;
- Superaquecimento de veículos e degradação acelerada dos pneus;
- Pressão sobre os custos de manutenção e construção de estradas e pontes;
- Maior estresse na integridade de pontes, expansão das juntas de concreto, aço, asfalto, revestimento de proteção e selantes;
- Degradação do asfalto, resultando em potenciais paralisações temporárias de tráfego ou aumento do congestionamento de rodovias durante o reparo.

Efeito Climático: aumento na ocorrência de chuvas extremas.

*Impacto potencial:*

- Aumento na ocorrência de atrasos e interrupções de trânsito relacionado ao clima
- Aumento na ocorrência de inundações nas rotas de evacuação;
- Aumento na ocorrência de alagamento em estradas e túneis;
- Aumento da ocorrência de deslizamentos de terra danificando estradas;
- Sistemas de drenagem mais susceptíveis à sobrecarga de maior frequência e severidade, causando inundações;
- Aumento de problemas mais graves e frequentes nas áreas onde as inundações já são comuns;
- Comprometimento da integridade estrutural de estradas, pontes e túneis se os níveis de umidade do solo tornarem-se demasiadamente elevados;

- Danos adversos na estrutura da estrada em função de água parada;
- Aumento da vazão de pico afetando o dimensionamento de pontes e bueiros.

Efeito Climático: aumento na ocorrência de estiagens.

*Impacto potencial*:

- Aumento da susceptibilidade a incêndios florestais, causando fechamento temporário;
- Aumento do risco de desmoronamento de áreas desmatadas pelo fogo.

Efeito Climático: mudanças nos padrões de chuvas sazonais e nas bacias de escoamento dos rios.

*Impacto potencial*:

- Degradação, insuficiência e substituição de estruturas viárias devido ao aumento de movimentos de terra e mudanças nos reservatórios de águas subterrâneas;
- Aumento dos custos de manutenção e reposição de infraestruturas rodoviárias;
- Perda do acesso às rodovias, em curto prazo, ou aumento do congestionamento em trechos de rodovias.

Efeito Climático: aumento da intensidade das chuvas.

*Impacto potencial*:

- Evacuações de emergência mais frequentes e potencialmente mais duradouras
- Mais detritos nas estradas, interrompendo viagens e transporte;
- Obras de arte e outras estruturas elevadas correm risco com altas velocidades do vento;
- Aumento de ameaça à estabilidade dos tabuleiros de pontes;
- Diminuição do tempo esperado de vida útil de rodovias expostos à tempestade;
- Risco de inundação imediata, com danos causados por força da água e danos secundários causados por colisões com detritos;
- Erosão de rodovias costeiras e de áreas de proteção à infraestrutura costeira;

- Danos aos sinais, iluminação e suportes;
- Redução da taxa de drenagem de terras de baixa altitude depois de chuvas e inundações.

Efeito Climático: aumento do nível do mar

*Impacto potencial*:

- Amplifica os efeitos de tempestades, causando interrupções mais frequentes em estradas costeiras e de baixa altitude devido aos temporais;
- Inundação permanente de rodovias ou nas vicinais baixas e nas zonas costeiras, com redução de opções de rotas;
- Inundações mais frequentes ou severas de túneis subterrâneos e infraestrutura de baixa altitude;
- Aumento da exposição de rodovias que antes não estavam sob risco de tempestades ou ondas à medida que o nível do mar sobe;
- Erosão na base das estradas e nas sustentações de pontes;
- Danos aos taludes da estrada sob risco;
- Redução da depuração de sedimentos sob pontes;
- Aumento dos custos de manutenção e reposição de túneis.

#### **2.1.5. Limitações**

A disponibilidade de informações tende a ser um fator limitante para a inclusão de ativos no escopo do estudo. É necessária uma variedade de informações para a avaliação de vulnerabilidade, mas apenas alguns dados podem ser extraídos de bases de dados das agências governamentais. Em alguns casos, os dados necessários podem estar em vários bancos de dados ou em diferentes formatos, o que pode exigir um esforço significativo para adaptar as informações a um formato utilizável.

## 2.2. Reino Unido – *Highways Agency Climate Change Risk Assessment* – HAC CRA (2011)

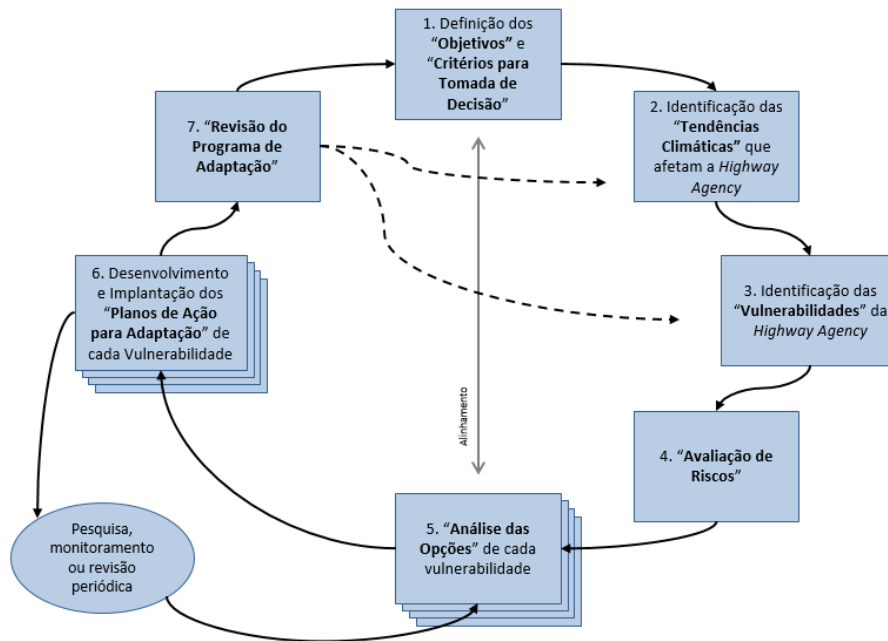
### 2.2.1. Objetivo

A *Highways Agency* (HA) opera, mantém e expande as principais rodovias da Inglaterra. Tem uma rede de 6.920 km de estradas por onde circularam, aproximadamente, 200.000 veículos por dia, em 2011. Segundo os autores, a HA já enfrentou problemas em sua rede, em função de eventos climáticos extremos. Existe a percepção de que tais eventos se tornem mais frequentes e severos, aumentando potenciais perdas econômicas com uma infraestrutura vulnerável. Assim, tem desenvolvido uma série de trabalhos que subsidiaram a publicação de um plano de ação, no ano de 2012.

O trabalho *Highways Agency Climate Change Risk Assessment* (HAC CRA, 2011) apresenta a metodologia de análise de risco aplicada às mudanças climáticas nos transportes rodoviários. O trabalho avaliou os potenciais riscos ao projeto, construção, operação, manutenção e melhorias da rede. Pretendem antecipar a compreensão desses efeitos em suas operações, como forma de oferecer soluções para reduzir ou remover os riscos.

### 2.2.2. Metodologia

A metodologia, que teve como referência HIGHWAY AGENCY (2009), apresenta o processo sistemático de identificação das atividades desenvolvidas pela HA que podem ser afetadas pelas mudanças climáticas, destacando os riscos e as oportunidades associadas e identificando as melhores opções para lidar com essas mudanças. A sistemática metodológica obedece aos princípios do planejamento contínuo, evidenciando: uma fase de determinação dos objetivos; identificação das tendências climáticas que afetariam as ações da HA; apresentação das principais vulnerabilidades; avaliação dos riscos; análise das principais opções de adaptação; implementação das ações a partir de um Plano de Adaptação; e monitoramento/revisão das medidas (Figura 2).



**Figura 2.** Metodologia da Highways Agency

Fonte: HACCR (2011)

A definição dos objetivos é a primeira fase e consiste no estabelecimento das principais questões que devem nortear a análise. É importante para determinar os limites da análise, a fim de que os esforços de investigação sejam somente para as questões realmente consideradas estratégicas.

Para a identificação das tendências climáticas foram utilizadas as informações oferecidas pelo *UK Climate Projections 2009* (UKCP09). Além das informações climáticas, o modelo oferece o grau de incerteza dos seus resultados, o que permite utilizar a abordagem de avaliação de risco. As variáveis que foram capturadas dos modelos foram: temperatura, precipitação, aumento do nível do mar e eventos climáticos extremos.

Destacam-se que as projeções tiveram como base os cenários do IPCC, com horizonte de tempo de 2080, levando em consideração o cenário SRES A1B, que é de média emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE). Para cada variável climática, foram projetadas as ocorrências em função das probabilidades e escolhido sempre o pior caso, ou seja, uma abordagem conservadora.

Em sequência, a partir das experiências passadas, foram listados os principais impactos nos ativos rodoviários e nos usuários (chamados de clientes). Consideram importantes os dados históricos recentes, visto, nos últimos anos, o país ter experimentado alterações climáticas pouco usuais, o que inclui: invernos mais rigorosos com temperaturas mais baixas, ocorrendo nevascas; maior incidência



de temporais durante o verão, levando a frequentes inundações; e temperaturas maiores que os picos médios históricos. Assim, esses eventos já descortinam as vulnerabilidades atuais da rede.

A próxima etapa da metodologia, levantamento das vulnerabilidades, para os autores consiste “nas atividades da HA que podem ser afetadas pelas mudanças do clima”, ou seja, o quanto são vulneráveis os ativos “receptores” dos eventos climáticos. Vulnerabilidade também pode ser entendida como a forma como os ativos são planejados, mantidos e operados frente às questões climáticas.

Para a identificação das vulnerabilidades sugerem a elaboração de uma matriz que organize e sistematize todas as vulnerabilidades (*vulnerability schedule*), a partir do cruzamento das atividades da HA com os eventos climáticos. No estudo foram identificadas cerca de oitenta vulnerabilidades.

O quarto passo metodológico consistiu na análise de risco de cada uma das vulnerabilidades indicadas, com o objetivo de criar uma hierarquização, oferecendo possibilidades de focar os esforços de adaptação às mudanças climáticas. Para tal, foi proposta uma análise semi-quantitativa, com base em uma escala de pontuação, para uma série de critérios e indicadores. A pontuação é fruto de um indicador agregado que envolve quatro critérios:

- Incerteza da previsão climática: determinada pela relação entre a incerteza das projeções e dos seus efeitos. Os indicadores são avaliados em uma escala qualitativa (alta/média/baixa incertezas), tendo como base uma revisão das informações climáticas e a opinião de especialistas sobre o quão confiável é o conhecimento sobre os seus efeitos;
- Extensão das interrupções: avaliado a partir da rede de transportes afetada, incluindo os seus usuários. Leva em conta a espacialização do evento climático. Os eventos climáticos extremos tendem a serem pontuais, já as anomalias nas temperaturas podem influenciar de forma regional;
- Severidade da interrupção: tem relação com o tempo necessário para reestabelecer o serviço à plena funcionalidade, no caso das vulnerabilidades que são sensíveis a eventos extremos, como inundações. Nos casos em que a vulnerabilidade aumentar a necessidade de intervenções gerenciais, como a manutenção preventiva, a severidade levará a interrupções, se a prática atual for mantida;
- Grau de mudança do clima: é uma medida do horizonte de tempo de cada evento climático, comparado com a vida útil do ativo/atividade avaliada. Compara-se a escala temporal dos eventos projetados, frente ao tempo de resposta do sistema. Assim, se

decisões alteram determinadas características nos padrões de construção, com respostas de longo prazo, enquanto que mudanças operacionais, em geral, são de curto prazo.

A partir da pontuação, é feita a priorização das vulnerabilidades pela análise de risco. As vulnerabilidades prioritárias serão as que apresentarem alto potencial de interrupção, alta criticidade temporal e alta confiabilidade. Por outro lado, não estão descartadas as vulnerabilidades que não foram classificadas como de alto risco no *ranking*. Estas podem ser passíveis de *early adaptations* em função de sua natureza estratégica, quando se aplicam a medidas de adaptação simples e potencialmente rentáveis financeiramente.

As vulnerabilidades passíveis de *early adaptations* são as que atendem aos seguintes critérios: (i) longo período de preparo do plano de ação de adaptação (p.ex. medidas que necessitam de maior pesquisa); (ii) necessário muito planejamento em função da grande quantidade de intervenções descentralizadas; (iii) há potenciais benefícios quando alterados os parâmetros construtivos, mesmo que a adaptação se refira a ativos muito intensivos em recursos e com vida útil longa.

Uma forma mais simples de indicar essas vulnerabilidades é identificar as ações que possam ser realizadas em menos de cinco anos.

Com base na avaliação de riscos é feita uma priorização “*altamente danoso, urgente, alta confiabilidade*”, com base em cinco indicadores: urgência; extensão das interrupções; intensidade das interrupções; e necessidade de maiores pesquisas. Cria-se, portanto, uma lista das vulnerabilidades com maior risco.

Com a lista, inicia-se um processo de análise de opções de adaptação, que tem por objetivo permitir a escolha das prioridades para a gestão de risco, associadas a cada uma das vulnerabilidades estabelecidas. Tal processo é importante para casos em que as preferências não são tão claras, principalmente do ponto de vista dos investimentos necessários. Uma vez selecionada, a opção preferida é traduzida em um plano de ação de adaptação.

### **2.2.3. Variáveis e indicadores climáticos**

Foram utilizadas quatro variáveis climáticas:

- Temperatura, considerado um aumento de 3 – 4 °C no verão. Indicadores: aumento da temperatura média, aumento da temperatura máxima;

- Precipitação, considerada diminuição média entre 11 e 27 %, até 2080, com invernos mais úmidos e os verões mais secos. Indicadores: precipitação média;
- Elevação do nível do mar, projetada para aumentar em 36 centímetros, até 2080;
- Eventos climáticos extremos, tendem a se tornar mais comum. Indicadores: ocorrência de chuvas extremas, aumento da velocidade dos ventos.

#### 2.2.4. Potenciais Impactos

Foram apresentados 80 impactos potenciais. A seguir, os efeitos climáticos e os respectivos impactos potenciais de interesse para este estudo:

Efeito climático: aumento da temperatura média

*Impacto Potencial*:

- Alteração na periodicidade de plantio de vegetação de entorno e manutenção;
- Menor necessidade em definir sinais de alerta;
- Redução das manutenções de inverno;
- Alteração visual;
- Melhora da visibilidade;
- Maior segurança.

Efeito climático: aumento da temperatura máxima

*Impacto Potencial*:

- Alteração da integridade do pavimento;
- Usuários afetados pela manutenção/renovações questão das obras/mudanças no bem-estar para os usuários.

Efeito climático: aumento da precipitação no inverno

*Impacto Potencial*:

- Aumento do acúmulo de água na estrada (aquaplanagem);

- Redução de segurança;
- Interrupção das operações.

Efeito climático: redução das chuvas no verão

*Impacto Potencial*:

- Alteração da qualidade das águas.

Efeito climático: Aumento da velocidade do vento

*Impacto Potencial*:

- Alteração da integridade das estruturas e da sinalização;
- Fechamento de estruturas expostas.

Efeito climático: Aumento do nível do mar

*Impacto Potencial*:

- Inundações costeiras;
- Restrição do acesso às estradas.

### **2.2.5. Limitações**

Dentre as limitações destaca-se a necessidade de um maior entendimento e quantificação das incertezas dos modelos climáticos. Há, por outro lado, uma preocupação maior com os desafios estratégicos de operar o sistema. Dentre as questões mais desafiantes, o estudo destaca:

A habilidade de lidar com as mudanças climáticas está diretamente ligada com a dependência de recursos financeiros, já que as mudanças, no longo prazo, será um desafio ao planejamento. Assim, é questionada a capacidade de adaptação do sistema.

Há grandes incertezas quanto à futura demanda por transportes e estradas, especialmente em longo prazo. Estudos existentes buscam capturar os custos e benefícios dessas intervenções ao longo de um período de 60 anos. Dentro desse período, há uma série de parâmetros que precisam ser projetados: PIB, preços de combustível, eficiência de veículos e outras tendências nacionais. No

entanto, novos comportamentos podem mudar tais projeções, o que traria grande incerteza aos modelos atuais, levando a decisões equivocadas.

### **2.3. Comunidade Europeia – *Impacts of Climate Change on Transport: A focus on road and rail transport infrastructures.* Nemry, F. & Demirel, H., 2012**

#### **2.3.1. Objetivo**

Apresentar uma visão geral da vulnerabilidade dos transportes às mudanças climáticas, com foco na infraestrutura rodoviária e ferroviária; analisar medidas específicas de adaptação; e sinalizar com questões importantes a serem consideradas pelos tomadores de decisão.

#### **2.3.2. Metodologia**

A análise considera dois intervalos futuros (2040-2070 e 2070-2100) para avaliar a deterioração da infraestrutura e os custos dos danos, alguns dos quais associados a medidas de adaptação. Foram utilizados dados de engenharia e informações sobre os mecanismos de deterioração e danos da infraestrutura, práticas de manutenção e custos envolvidos.

São considerados três cenários globais de emissão, com realização de modelagens: Cenário Médio – A1B; Cenário de Baixa Emissão – E1; e um Cenário de Elevadas Emissões – RCP 8.5.

Para cada caso a vulnerabilidade foi avaliada considerando indicadores de risco, com posterior identificação das áreas geográficas e dos riscos associados à infraestrutura – ou infraestruturas críticas (mapas). Dependendo da categoria do impacto, a distribuição geográfica do risco é mais ou menos desigual. Ao todo, esses padrões irregulares, a incerteza sobre futuras emissões de gases de efeito estufa e significantes variações entre os modelos climáticos representam um importante desafio ao custo de estratégias de adaptação eficientes.

Para o caso da infraestrutura de transportes, essa questão é particularmente crítica, diante da vida útil dos equipamentos envolvidos (estradas, pontes, portos marítimos).

O estudo fez uma estimativa inicial de risco futuro de elevação do nível do mar (1 m) e tempestades (100 anos de recorrência) e consequentes efeitos na infraestrutura rodoviária. Na Europa, é de 4,1 % o risco de inundação permanente ou episódica da infraestrutura costeira.

Foram selecionados quatro estudos de caso para análise envolvendo diferentes aspectos climáticos. O conteúdo e estrutura de apresentação dos estudos são similares, como detalhado para o primeiro estudo:

#### **Estudo de Caso 1: Adaptação às temperaturas mais elevadas: pavimento rodoviário**

- O estresse térmico e a liga asfáltica
- Descrição do problema
- Metodologia, dados e premissas
- Dados climáticos e indicadores
- Desempenho da liga asfáltica e custo
- Infraestrutura rodoviária
- Cálculo dos custos de adaptação
- Resultados
- Exposição e vulnerabilidade
- Custos de adaptação
- Consequências em condições de inverno mais brandos
- Custos totais
- Observações finais

#### **Estudo de Caso 2: Adaptação ao estresse térmico: efeito de flambagem nos trilhos das ferrovias.**

- Estudo de Caso 3: Adaptação às precipitações extremas: erosão das pontes.
- Estudo de Caso 4: Vulnerabilidade da infraestrutura: o aumento do nível do mar e tempestades com picos de ondas.

#### **2.3.3. Variáveis e Indicadores Climáticos**

Foram utilizadas combinações de diferentes tipos de informações espaciais, incluindo:

- Aspectos Climáticos: precipitação (precipitação extrema e alagamentos), temperatura (estresse calor);
- Informações físicas: elevação do nível do mar, dados hidrológicos, tipos de solo, temperatura do pavimento;

- Informações sobre transporte: infraestrutura, redes e atividades de transporte;
- Tipos de infraestrutura: rodovias, ferrovias, pontes; e
- Vida útil da infraestrutura: de 7 anos a mais que 100 anos.

Os indicadores de risco considerados foram:

- 7 dias com temperaturas máximas nos pavimentos;
- Número de dias que excedam os limiares considerados críticos para o transporte ferroviário de risco de flambagem;
- Pontes expostas a 20 – 40 % de aumento na vazão dos rios, em 100 anos;
- Infraestruturas costeiras com risco de inundação.

#### **2.3.4. Potenciais Impactos**

Tanto as condições médias como as extremas representam componentes no custo da infraestrutura. Os estresses representam de 30 a 50 % dos custos atuais de manutenção na Europa, sendo que 10 % desses custos estão associados a extremos climáticos, tendo chuvas intensas e alagamentos como principais contribuintes.

Foi construída uma tabela síntese *“Seleção dos impactos e medidas de adaptação”* considerando:

- Efeitos das mudanças climáticas: mudanças na temperatura, na precipitação e na vazão dos rios; elevação do nível do mar e tempestades no mar com grandes ondas;
- Modal: rodoviário e ferroviário;
- Componentes do sistema de transporte: infraestrutura, operação, pontes;
- Ciclos de manutenção: 7-10 anos de ciclo de manutenção e > 100 anos de vida útil;
- Mapa de risco: risco de rachaduras no pavimento, risco de danos às pontes com correntezas, riscos de inundações temporárias ou permanentes;
- Quantificação de custos de adaptação: mudanças na liga asfáltica, limitação de velocidade em função das condições de tráfego, fortalecimento das fundações das pontes;

- Impactos evitados: redução da degradação do pavimento das rodovias – evita acidentes – danos aos veículos, lesões e fatalidades; danos às pontes – evita acidentes e fatalidades.

### 2.3.5. Limitações

Ambos os custos de vulnerabilidade e adaptação foram avaliados com base em uma resolução espacial maior, um método mais realista para simulação de processos de inundação. Devido a essas limitações, os custos avaliados representam uma primeira estimativa e não pode ser interpretado como um custo de adaptação.

Além de fornecer magnitudes dos custos climáticas para o transporte na UE e algumas medidas de adaptação, o estudo também ilustra que esse tipo de pesquisa é altamente especializado e sua avaliação depende de uma quantidade considerável de dados de diferentes fontes (alterações climáticas, engenharia, rede de transportes, modelagem de transporte, análise de informação espacial, micro e macro análise econômica).

A incerteza quanto aos dados climáticos e aos modelos de projeções é significativa, especialmente quando se utiliza valores extremos (ex. precipitação). Esse tipo de consideração é fundamental, especialmente onde há necessidade de modelagem (ex. inundações do rio), aumentando assim a incerteza geral.

Importantes lacunas de dados e incertezas também dizem respeito ao próprio sistema de transporte (p. ex. dados da infraestrutura, tamanho, idade e distribuição geográfica, custos de manutenção, vulnerabilidade atual e deficiências, tráfego, práticas de manutenção).

Estatísticas sobre eventos/danos são surpreendentemente inexistentes para a maior parte da Europa ou pelo menos não estão facilmente disponíveis.

Custos de adaptação de baixos a moderados foram estimados para os quatro estudos de caso, mas são necessárias mais pesquisas e evidências para se obter um quadro mais abrangente. O custo de adaptação pode ser minimizado com a integração da dimensão climática no planejamento da infraestrutura e das atividades de manutenção do setor de transporte.

Com o propósito de tornar a infraestrutura de transporte resiliente constam do *Transport White Paper* as condições a serem observadas nos futuros projetos de infraestrutura: "*Os projetos devem refletir, igualmente, a necessidade de infraestrutura que minimiza o impacto sobre o meio*



*ambiente; que seja resistente ao possível impacto das alterações climáticas; e que melhore a segurança dos usuários".*

Dados e metodologia de trabalho serão necessários para incluir adequadamente essa dimensão nos projetos de infraestrutura orientados para análise de custo-benefício.

Dois aspectos fundamentais sobre a adaptação da infraestrutura de transporte também surgiram a partir da literatura e de especialistas consultados. Por um lado, atualmente desastres ou danos são muitas vezes atribuídos a deficiências ou a práticas "ultrapassadas" de manutenção (p. ex. manutenção de bueiros e sistemas de drenagem).

Por outro lado, a vida útil da infraestrutura de transporte, combinada com as incertezas climáticas (mais de 20-100 anos) dificulta a tomada de decisões sobre estratégias de adaptação. Com base em estudos de caso e quando há realização de análise de custo-benefício, duas estratégias de adaptação podem ser previstas:

- A gestão adaptativa – Adaptação é incremental e executada ao longo de sucessivos prazos de curta duração (ex. 10 anos). A vantagem é gerenciar a incerteza das alterações climáticas de forma iterativa, com base nas alterações climáticas gradualmente cada vez mais confiáveis, reduzindo o risco de se comprometer com elevados investimentos, o que seria inadequado;
- A one-off adaptation, assume-se que é realizada somente uma vez, para lidar com as questões de longo prazo;

Outra questão a ser considerada diz respeito aos parâmetros de projeto de construção, que precisam ser revistos à luz de cenários climáticos e riscos avaliados (p. ex. o risco de erosão de pontes).

## **2.4. Australia – *Impact of Climate Change on road infrastructures. Austroads, 2004.***

### **2.4.1. Objetivo**

Examinar alterações no custo de estradas como resultado das mudanças climáticas projetadas. É feita uma análise tanto de temperatura como de chuva, englobando a questão da umidade, além de uma análise de elevação do nível do mar, que não é abordada para efeito de utilização no presente estudo.

O texto destaca que a compreensão das mudanças climáticas e dos possíveis impactos por parte de planejadores, designers e dirigentes pode colaborar para a economia nos custos das infraestruturas a longo prazo, sendo preparadas desde cedo para melhor lidar com as questões futuras.

O texto aponta alguns pontos-chaves que o estudo procurou suprir:

- Identificar os possíveis locais afetados pelas mudanças climáticas, pelos próximos 100 anos, baseado nos melhores estudos científicos disponíveis;
- Avaliar os prováveis impactos sobre os padrões demográficos e industriais, ou seja, sobre a demanda por infraestrutura rodoviária;
- Identificar os prováveis efeitos e potenciais medidas de adaptação na construção e manutenção da infraestrutura rodoviária existente;
- Relatar as implicações políticas decorrentes dos resultados do projeto.

#### **2.4.2. Metodologia**

A partir de uma caracterização climática, faz uma análise dos impactos das mudanças climáticas na infraestrutura rodoviária.

A análise climática se baseia no cenário climático A2, do IPCC, e utiliza dois modelos, CSIRO's AOGCM – *a comprehensive general circulation model that contains atmospheric, oceanic, sea-ice, and biospheric submodels* – e o regionalizado – *Conformal-Cubic General Circulation Model (GCM)*. O CSIRO é um modelo desenvolvido pelo grupo de pesquisa *CSIRO Division of Atmospheric*. As informações coletadas nesta etapa foram posteriormente tratadas, gerando parâmetros requeridos para a análise de pavimento.

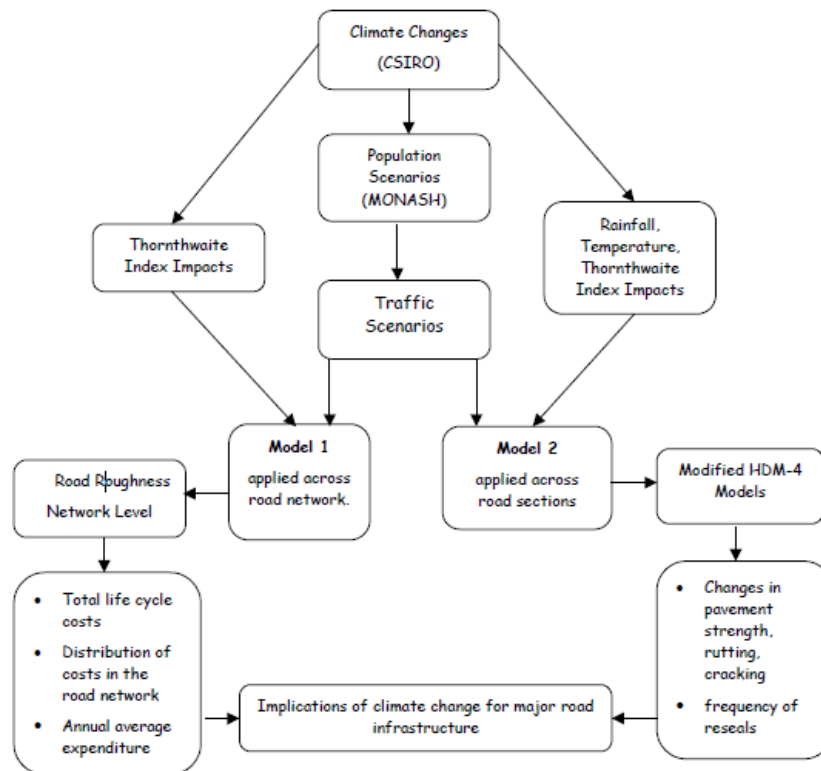
Também, foi realizada uma análise de projeção populacional, levando em conta a questão climática, com base em modelos específicos, para projetar o crescimento da população envolvendo: natalidade, mortalidade, imigração e a migração interna para regiões com clima mais confortável.

A união das duas projeções foi realizada por especialistas, com base em um índice de conforto, baseado na temperatura e umidade local.

Na etapa seguinte, considerou-se a demanda por infraestrutura de transporte, com base nas projeções populacionais analisadas previamente. Para tanto, foram utilizados alguns indicadores: média anual de tráfego diário; % de veículos pesados; e média de *Equivalent Standard Axels (ESA)*.

Posteriormente, avaliou-se a influência do clima no pavimento das estradas, a maioria com pavimento asfáltico. As estradas analisadas são de responsabilidade do *National Highway System*. Foram utilizados dois modelos de deterioração de pavimento: o *ARRB Transport Research Pavement Life Cycle Costing (PLCC)* e o *Highway Development and Management (HDM-4)*.

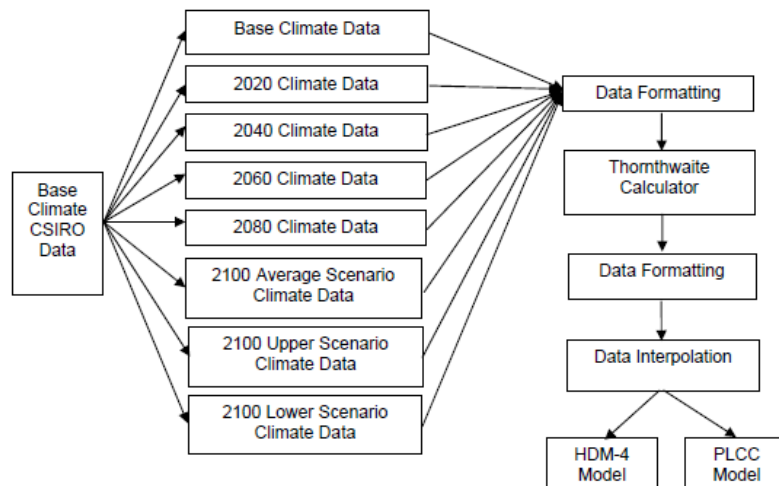
A Figura 3 apresenta, de forma resumida, a metodologia utilizada no estudo australiano.



**Figura 3.** Estrutura do projeto

Fonte: Austroads, 2004

Os resultados encontrados no modelo climático CSIRO serviram de base também para os modelos de deterioração do pavimento. A Figura 4 mostra, resumidamente, como se processa esse modelo climático para fornecer os dados de entrada.



**Figura 4.** Caminho para o processamento de dados

Fonte: Austroads, 2004

Além disso, a umidade é um dos fatores que contribuem para a deterioração do pavimento, e por isso também é analisada a partir da investigação do índice *Thornthwaite*, que é utilizado pelo modelo HDM-4.

O estudo ainda realiza análises de elevação do nível do mar e, principalmente, de salinidade. No entanto, tendo em vista o escopo delimitado para o estudo desenvolvido pela equipe COPPE/IME estas questões não serão abordadas nesta revisão.

### 2.4.3. Variáveis e Indicadores Climáticos

Foram consideradas as variáveis temperatura e precipitação e as variações climáticas médias:

- Precipitação máxima, média e mínima;
- Temperatura máxima, média e mínima;
- Radiação solar máxima, média e mínima;
- Evaporação potencial e atual.

Outros dados também foram utilizados como entrada para a modelagem dos pavimentos:

- ID Data (identificador de localização grid)
- Longitude

- Latitude
- Máscara (indicando se a célula analisada está localizada sobre a terra ou do mar)
- T média (temperatura média mensal em grau C)
- Precipitação (chuva média mensal em mm)
- T média “Sc” (mudança em grau C por grau C do aquecimento global)
- Precipitação “Sc” (Variação percentual por grau C do aquecimento global)

#### Variáveis construtivas

Ainda para os modelos de deterioração foram utilizados indicadores específicos.

#### Para o PLCC

- Média anual de trafego diário
- Percentuais de veículos pesados;
- Resistência do pavimento/subleito;
- Idade do pavimento;
- Rugosidade do pavimento;
- Índice classificação climática.

#### Para o HDM-4

- Categoria da rodovia (urbano, rural, não vedadas)
- Tipo de reabilitação (granular, asfalto);
- Fator de calibração da deterioração;
- Deterioração;
- Média anual de tráfego diário;
- Percentagem de veículos pesados;
- Idade média do pavimento;
- Resistência do pavimento;

- Rugosidade inicial média;
- Rugosidade mínima após a reconstrução;
- Clima (temperatura e precipitação);
- Média do índice de Thornthwaite;
- Comprimento da estrada;
- Quilômetros da pista;
- Área da pista;
- Declive e aclave;
- Curvatura.

#### 2.4.4. Potenciais Impactos

O estudo aponta que a umidade e a temperatura são os dois maiores influenciadores para a deterioração rodoviária – a umidade afeta a performance da estrutura do pavimento e a temperatura afeta a performance da superfície. Por conta do tempo do projeto e do orçamento do mesmo, não foram analisados o impacto dos eventos extremos tal como: chuvas fortes, temperaturas extremas ou frequência de inundações.

Após a avaliação dos modelos, foi possível observar os estágios de deterioração, apresentando as medidas específicas. Ambos apontam alguns desgastes do pavimento das estradas.

O modelo PLCC, p. ex., permitiu aos pesquisadores considerar o valor de deterioração coerente com o esperado, tendo em vista que as estradas são regularmente mantidas em bom estado no país. Dessa forma, os autores concluem que para o país como um todo não haverá gastos adicionais aos programados para a manutenção e reabilitação das estradas nacionais. No entanto, as análises por estados já se mostram um pouco diferentes, com alguns tendo gastos aumentados, relacionado à idade e ao tempo de vida útil do pavimento utilizado.

Já o HDM-4 analisa também o custo de manutenção das estradas e dá o resultado em uma medida específica, da mesma forma que o PLCC. A medida do HDM-4 é a “*base alternative*” – mínimo de programa de manutenção periódica, considerando apenas a manutenção de rotina. Os autores destacam que os custos de manutenção são apresentados como um programa de obras, ao longo de um período de 20 anos. E o valor programado para essa manutenção não seria afetado pelas

alterações climáticas. Porém, dependendo da condição inicial do pavimento em análise, diferentes níveis de despesas de capital e despesas correntes podem ser necessários para novas obras, de forma a atender às condições do pavimento desejado.

Além disso, poderá haver um aumento considerável no custo de manutenção posterior a este período inicial de 20 anos. Os autores apontam que sob o cenário climático e projeção de tráfego para 2100, os custos poderão se acrescer em até 57 %.

#### **2.4.5. Limitações**

Assim como em outros estudos, os autores australianos enfrentaram problemas com a aquisição de dados e limitação do escopo. O estudo destaca que não foi feita nenhuma análise sobre as estradas de menor porte, que não estão no domínio do sistema nacional, por conta da ausência dos dados.

Ainda mencionam a questão financeira como limitador para o desenvolvimento do estudo da forma pretendida e atribuem a não realização da análise de extremos climáticos – precipitação extrema, temperatura extrema ou frequência de inundações, eventos que impactam as rodovias – e das análises de estratégia de manutenção e de informações mais específicas, em virtude da falta de orçamento para o seu desenvolvimento.

Além disso, a questão da projeção climática continua sendo apontada pelos autores como um problema a ser considerado. Descrevem as incertezas dos padrões climáticos encontradas como um empecilho para a tomada de decisão.

### **2.5. França – *Climate Change Vulnerabilities and Adaptation possibilities for transport infrastructures in France.* Cochran, I., 2009.**

#### **2.5.1. Objetivo**

Analisar os riscos impostos pelas mudanças climáticas à infraestrutura de transporte francesa (passageiro e carga), considerando os seguintes modais: rodoviário, ferroviário, aeroviário e navegação interna.

Observa-se que o estudo procurou preencher uma lacuna de conhecimento, uma vez que não havia, até então, um estudo sólido para o caso francês. Utilizam como base muitos estudos internacionais (os americanos são os mais referenciados).

### 2.5.2. Metodologia

O estudo inicia com uma caracterização da infraestrutura de transporte, de forma a melhor entender quais são as vulnerabilidades de cada um dos setores.

Avalia tanto o transporte de terra – rodoviário e ferroviário – quanto marítimo – portos e canais – e aéreo, e para cada um realiza uma caracterização. Tendo em vista o interesse para este estudo na estrutura rodoviária, serão destacadas, apenas, as classificações utilizadas para as rodovias nacionais (incluindo as autoestradas), as rodovias departamentais e as rodovias locais.

A responsabilidade administrativa das estradas é dividida tanto por atores públicos como privados, sendo a parcela maior administrada pelo setor público em dois diferentes órgãos – *Direction Générale des Routes* (DGR) e a *Direction de la Sécurité et de la Circulation Routières* (DSCR). No entanto, ao se analisar as estradas, observa-se que o setor privado tem maior domínio.

Posteriormente, é feita uma análise usando modelos climáticos, dando destaque para a necessidade de uma abordagem regional. São utilizados dois modelos regionalizados – *Météo France's Centre National de Recherches Météorologiques* (CNRM) e o *Institut Pierre-Simon Laplace* (IPSL) – e os cenários de emissão A2 e B2, do IPCC, com horizonte temporal de 1960-1989 e 2070-2099.

Prosseguindo, é feita uma análise sobre os impactos na infraestrutura de transporte nos seus diferentes setores. Para tanto, é utilizado um modelo de mapeamento desenvolvido para a França. São identificadas as estradas e colocadas, em forma de mapa de sobreposição, as informações provenientes dos modelos climáticos, identificando as áreas de maior aumento de temperatura e precipitação.

A última etapa do estudo discute, rapidamente, as potenciais medidas adaptativas, dando ênfase aos atores participantes.

### 2.5.3. Variáveis e Indicadores Climáticos

São feitas análises somente de temperatura e precipitação, ampliando para as análises climáticas das médias e dos extremos.

Não são especificados muitos indicadores no que tange a temperatura, tal como: “x dias consecutivos de temperatura igual ou maior que x graus”. No entanto, em uma tabela apresenta uma lista de possíveis impactos, onde estão relacionadas também algumas “variáveis climáticas”, como por exemplo:



- Aumento da radiação solar;
- Aumento na temperatura e nas ondas de calor;
- Diminuição da umidade;
- Diminuição na variação em períodos de seca e chuva.

No entanto, o texto não deixa claro se foram essas as variáveis escolhidas para o estudo. De forma clara, aponta somente a sobreposição dos mapas e a identificação das localidades que sofreram maior aumento de temperatura, com identificação das estradas presentes naquelas localidades.

No que tange à composição da variável precipitação, os indicadores apontados foram formulados com base em informações de outras referências que usaram o modelo ARPEGE [*earth modeling system which couples different components of the climate system (atmosphere, ocean, land-surface, sea ice)*]. Por exemplo, é feita uma análise de números de dias de inverno com mais de 10 mm de chuva.

Além disso, são apresentadas outras “variáveis climáticas” descritas na tabela de potenciais impactos provenientes da literatura, onde são apontadas aquelas com problema para a infraestrutura de transporte: aumento das chuvas diárias e frequência e intensidade das tempestades.

Um dos contribuintes para que a análise não seja tão específica, e como dita pelo autor, seja tomada como indicativa, é a falta de dados técnicos específicos para as infraestruturas. O autor destaca que o tipo de pavimento usado no país varia bastante de região para região, assim como as informações das normas climáticas de construções de cada infraestrutura, que também não estavam disponíveis.

#### **2.5.4. Potenciais Impactos**

Foram utilizadas algumas referências bibliográficas para apontar a lista de possíveis impactos que o país poderá sofrer, mas destaca que uma alteração na temperatura, tomando como referência o cenário de hoje, poderá provocar alterações em diferentes rodovias, como maior desgaste do pavimento – dada a diminuição de umidade do solo – e ainda pode provocar danos provenientes de queimadas. O texto traz, como destaque, as peculiaridades de cada região, apontando que as variações poderão se dar de forma diferente.

Aponta, como forma indireta das mudanças climáticas no transporte, uma pesquisa que destaca o comportamento dos motoristas em função de alterações na temperatura:

*“Equally, research concerning the impacts of temperature on driver behavior indicates an increase in the risk of an accident related to increased heat-stress conditions” (Stern & Zehavi, 1990, as cited in Koetse & Rietveld, 2009:213).*

Já no que tange à análise de precipitação, destaca que já há constante enfrentamento na atualidade, em determinadas regiões.

Apesar do texto não tratar de custos diretamente, o autor destaca que eventos extremos, e também alterações nas médias, poderão aumentar tanto a frequência quando o custo de manutenção das infraestruturas. Além disso, usa, como exemplo, estudo realizado, em 2006, com um viés mais econômico do que o estudo em questão, sobre uma inundação em determinada região do país (*Artois-Picardie*), ocorrida em 2001. Foram estimadas perdas econômicas de 140 a 160 milhões de euros, dos quais 55 milhões em danos e perdas operacionais em infraestrutura rodoviária. Destaca que as inundações e ondas de calor são eventos custosos e perturbadores.

Uma análise sobre o impacto dos ventos também é realizada, no entanto, é breve e como não será abordada no estudo brasileiro, não foi aqui especificada, assim como os outros setores – ferroviário, aéreo e navegação.

Além disso, é apresentada uma análise das mudanças climáticas sobre três setores: turismo, habitação e produção agrícola. Revela as vulnerabilidades desses setores, e destaca que alterações na infraestrutura de transporte pode alterar diferentes subdivisões da economia. Chama a atenção, em especial, para como alterações climáticas modificariam a infraestrutura de transporte e quais seriam as consequências no padrão turístico francês.

### **2.5.5. Limitações**

Destaca-se o movimento pioneiro deste trabalho na França, que busca elucidar novas questões do impacto do clima no transporte e também como as incertezas climáticas devem ser consideradas. No entanto, assim como em outros estudos, o autor apontou a ocorrência de empecilhos para o seu desenvolvimento.

Muitas das informações requeridas para o estudo ou não estavam disponíveis ou não existiam ou estavam localizadas em diferentes departamentos/órgãos/fontes,, dificultando, de forma significativa, sua obtenção e conseqüente tratamento. Essa falta de informações padronizada e agrupada, também da caracterização do pavimento das rodovias, foi outro problema citado. Além disso, foi ressaltado que o país possui peculiaridades de região para região, o que interfere na análise.

Ademais, a falta de informações detalhadas dos modelos climáticos e também as incertezas agregadas foram apontadas como limitações para o desenvolvimento do estudo francês.

## **2.6. Nova Zelândia – *Climate Change Effects on the Land Transport Network. Volume 1: Literature Review and Gap Analysis. Gardiner et al. (2008a)***

### **2.6.1. Objetivo**

Esta publicação faz parte do projeto desenvolvido em dois estágios (volume 1 e 2) que tem os seguintes objetivos:

- Identificar e avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre as redes de transporte terrestre da Nova Zelândia (rodoviário, ferroviário, portos e navegação costeira);
- Formular recomendações, incluindo opções de adaptação, para suprir as lacunas de informação e lidar com os riscos identificados;
- Fornecer informações necessárias sobre adaptação de projeto, operação e manutenção de ativos críticos, com relação aos efeitos das mudanças climáticas antropogênicas, para os fornecedores de infraestrutura de transporte e formuladores de políticas.

Nesse contexto, o primeiro estágio (volume 1) – Revisão da Literatura e Análise de Lacunas – compreende uma revisão da literatura dos efeitos das mudanças climáticas sobre as redes de transportes rodoviário, ferroviário, portos e navegação costeira, para determinar sua extensão, tendo como foco as agências de governo, governos locais, institutos de pesquisa, universidades e agências privadas. Inclui uma avaliação de como essa literatura identifica, de forma adequada, as potenciais tendências das alterações climáticas e as implicações para o funcionamento e gestão dessas redes de transporte terrestre, bem como a identificação e priorização de lacunas no conhecimento.

### **2.6.2. Metodologia**

A metodologia adotada no primeiro estágio (volume 1) pode ser assim resumida:

- Revisão da literatura publicada e inédita para identificar: efeitos relevantes da variabilidade e mudanças climáticas; lacunas no conhecimento; respostas aos efeitos das mudanças climáticas sobre a concepção, construção, operação e manutenção de estradas, ferrovias, portos e navegação costeira na Nova Zelândia e internacional;

- Questionário *online* sobre mudanças climáticas aplicado aos operadores da rede de transporte terrestre e empreiteiros, autoridades governamentais centrais e locais e instituições de pesquisa, para forneceram *feedback* sobre necessidades de pesquisa, respostas de adaptação e barreiras para as redes de transportes terrestres serem planejadas, projetadas, operadas e mantidas para gerir os efeitos das mudanças climáticas;
- Análise climática resumida, a partir das informações disponíveis sobre os efeitos prováveis, predominantemente com base nos relatórios do IPCC – Terceiro Relatório de Avaliação (TAR) e Quarto Relatório de Avaliação (AR4) (IPCC, 2007);
- Análise da legislação e políticas, verificando em que medida a extensão dos efeitos das mudanças climáticas sobre as redes de transportes terrestres é tratado focando nas diretrizes do governo central. Observa-se que não se trata de uma análise detalhada de como as orientações estão sendo traduzidas em políticas e planos locais;
- Análise de risco, usando uma abordagem de matriz de risco, com os efeitos das alterações climáticas e os seus riscos para operações rodoviárias, ferroviárias, portos e navegação costeira identificados e priorizados pelos especialistas. Uma avaliação inicial foi realizada para definir limites, a partir dos quais as redes de transporte terrestre se tornariam inoperáveis, juntamente com medidas de respostas apropriadas;
- Análise modal (rodoviário, ferroviário e portos/navegação costeira). Os resultados da análise de risco foram usados para fornecer um entendimento inicial dos efeitos das mudanças climáticas sobre a forma como as principais variáveis climáticas podem afetar o projeto ou operação das redes de transporte. Considerações regionais foram discutidas, com a identificação de amplos padrões espaciais de efeitos das mudanças climáticas;
- Análise de lacunas-chave em informação, conhecimento ou prática (cobrindo ciência do clima, políticas e modais individuais) e as respostas possíveis para resolvê-las, priorizadas com base nas implicações e nos valores envolvidos.

Destaca-se que para identificação e priorização dos riscos dominantes nas redes de transporte, frente aos efeitos das mudanças climáticas, foi usado o método de matriz de risco apresentado na Figura 5.

Nesse método, o risco foi definido em termos do grau de severidade de efeitos indesejáveis potenciais ou resultados (consequências) e da probabilidade (ou frequência) ocorram, em uma escala de cinco pontos. Esses escores são então multiplicados para dar uma medida de risco, que vão desde a pontuação de 1 (menor risco), a pontuação máxima de 25 (maior risco). Escores de 1 a 4 foram então classificados como de baixo risco, 9 como moderado e de 10 a 25 como alto.

As categorias de efeitos de mudanças climáticas foram definidas e eventos de perigo específicos (ameaças) identificados e atribuídos à categoria relevante. Isso permite uma compreensão dos efeitos importantes das mudanças climáticas (que requerem mais estudo) e a natureza dos eventos de risco mais elevados. A distinção entre categorias foi feita, em parte, considerando como o efeito da mudança climática seria modelado e estudado. Por exemplo, apesar de as chuvas e inundações se sobreporem, modelagem de inundação é muito mais complexa que a modelagem de chuva isolada.

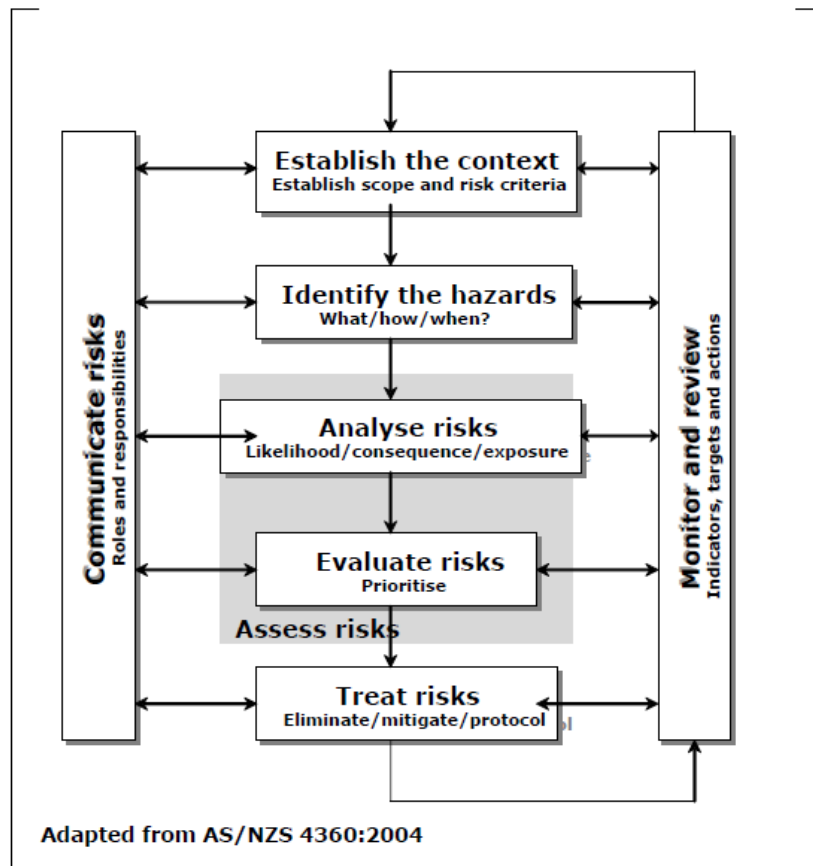


Figura 5. Método de Matriz de Risco

Fonte: Gardiner *et al.*, 2008<sup>a</sup>

As consequências de interesse são aquelas que incidem, significativamente, sobre os sistemas de transporte. A probabilidade de tais efeitos ocorrerem irá depender se as alterações climáticas são tão graves e tão frequentes como previstos e, dado que este seja o caso, a probabilidade do efeito sobre sistemas de transporte é significativa em qualquer situação.

Ao considerar os riscos, os cientistas do clima foram convidados a avaliar o nível atual da certeza das projeções das mudanças climáticas para cada efeito das alterações climáticas. O nível de incerteza para cada fonte de risco foi classificado como "muito alto", "alto", "médio" ou "baixo".

O resultado desse processo foi um registro de riscos combinados para os três modos de transporte, identificando os mais significativos. Finalmente, foram identificadas lacunas no conhecimento. Além da determinação do risco, o processo avaliou, sempre que possível, os limiares de tolerância de projeto e operação em que os efeitos climáticos afetam negativamente o funcionamento

das redes de transportes. Essa avaliação não foi totalmente bem sucedida, porque só alguns puderam ser identificados:

- Projeto de muro de contenção (*stopbank*) para atender 1 em 400 anos de chuva e eventos de inundações;
- Projeto de pontes para permitir uma inundação de 1 em 100 anos sem causar danos significativos.

Outros não puderam ser identificados pelos seguintes motivos:

- Detalhes de padrões de projeto de infraestrutura e vulnerabilidades, relacionados com o clima, não eram prontamente disponíveis;
- Normas de projeto para a infraestrutura de vida curta, como pavimentos rodoviários betuminosos, podem variar de acordo com as condições locais e foram consideradas para serem adaptáveis às previstas mudanças climáticas nas revisões regulares de padrões de projeto. Os custos de substituição, caso fracassem, foram considerados baixos;
- Os efeitos das mudanças climáticas são preditos como tendências de longo prazo, envolvendo variâncias de curto prazo. Por exemplo, temperaturas médias são susceptíveis de aumentar gradualmente, embora anos mais frios também são susceptíveis de ocorrer dentro de uma tendência de longo prazo. Muitos dos efeitos previstos estão dentro da faixa da variabilidade climática atual, particularmente, em curto e médio prazo, e os sistemas de transporte sempre têm um grau de resiliência a esses efeitos.

Embora tenha sido originalmente destinado a avaliar os riscos em diferentes horizontes de tempo (10, 50 e 100 anos), na realidade, os especialistas sentiram que era apenas possível fazer julgamentos subjetivos de risco, com base no efeito de longo prazo, para ser percebido, o mais provável, nominalmente 100 anos no futuro. Os impactos no curto prazo, em geral, estão contidos dentro da variabilidade do clima atual, enquanto em médio prazo, os efeitos seriam semelhantes, mas reduzidos comparativamente àqueles antecipados no longo prazo. Além disso, os resultados foram muito semelhantes ao que se poderia esperar de forma intuitiva. Os resultados também estão de

acordo com estudos semelhantes no exterior (se diferenças climáticas são contabilizadas) sem novos ou altos riscos inesperados.

### 2.6.3. Variáveis e Indicadores Climáticos

As variáveis e indicadores climáticos foram utilizados para descrever as possíveis mudanças para as condições climáticas médias e extremas, em dois cenários de tempo – 2040 (2030-2049) e 2090 (2080-2099) – com referência à distribuição espacial (regional) de efeitos. Aqueles compatíveis com este estudo são apresentados, a seguir, e foram obtidos a partir de *downscaling* estatístico de 12 AOGCM diferentes, para cada um dos futuros períodos.

#### *Temperatura média e extrema*

- Alterações projetadas na temperatura anual (em ° C) para 2040 e 2090, em relação a 1990;
- Aumento previsto no número de dias com uma temperatura máxima do ar superior a 25° C, associada com um aquecimento de 2° C na temperatura média (2090);
- Precipitação média e extrema;
- Alterações projetadas na precipitação anual (%) para 2040 e 2090, em relação a 1990;
- Aumento previsto em 24 horas com 100 anos ARI (*Average Recurrence Interval* – Intervalo Médio de Recorrência) de precipitação total, associado com um aquecimento de 2 °C na temperatura média;

#### *Seca*

A atual seca de um em 20 anos, para um Cenário "baixo-médio" (*low-medium*) e "médio-alto" (*medium-high*), para 2080.

#### *Média e extremo de vento*

Alteração (em %) em 99 percentil na velocidade do vento de 10 m/s (velocidade do vento diária que excede somente 1% do tempo), na temporada de inverno entre um "run" controle (1980-1999) e uma simulação do clima no cenário A2, para 2080-2099.



## Ciclones Extratropicais e Tempestades de Latitudes Médias

Devido à baixa confiança nos impactos previstos da mudança climática sobre os padrões de tempestades, as implicações regionais de t para as redes de transportes terrestres não são capazes de ser avaliadas.

## Elevação do Nível do Mar

Projeção no médio prazo da elevação do nível do mar de 0,2 m, até 2050 e 0,5 m, em 2100, para fins de planejamento e projeto, até projeções atualizadas tornarem-se disponíveis.

### **2.6.4. Potenciais Impactos**

Para determinação e priorização dos riscos, os efeitos das mudanças climáticas foram classificados nas seguintes categorias:

- Temperatura alta extrema (incluindo temperatura aérea e terrestre);
- Precipitação (incluindo as de alta intensidade e as alterações em média de chuvas, as águas subterrâneas e umidade do solo);
- Inundações (incluindo rio e inundação superficial);
- Seca (incluindo baixo nível de rios);
- Erosão no interior e instabilidade (incluindo a erosão do solo e deslizamentos de terra);
- Ventos fortes;
- Nevoeiro e umidade;
- Inundações costeiras (incluindo aumento do nível do mar e tempestades no mar);
- Erosão costeira;
- Incêndio e relâmpago.

Considerando as categorias de efeitos citadas, os maiores riscos prioritários, identificados nas redes de transportes terrestres rodoviária, ferroviária, porto e navegação costeira, dizem respeito a:

- Inundação costeira causada pela elevação do nível do mar, combinada com tempestade (portos, mas também corredores de transporte terrestres costeiros potencialmente em risco);
- Inundação (todos os modais);
- Alta pluviosidade e erosão interior / instabilidade (rodoviário e ferroviário);
- Temperaturas altas prolongadas (problema para linhas contínuas ferroviárias soldadas, particularmente).

As redes rodoviárias foram consideradas as mais vulneráveis às mudanças climáticas, estando sujeito a mais riscos significativos e um grande número de riscos elevados. Além disso, as redes existentes são mais vulneráveis que as novas.

Os efeitos potenciais das alterações climáticas na rede rodoviária nacional foram avaliados e estão resumidos no Quadro 2. Observa-se que essa é uma ampla avaliação dos efeitos potenciais, que não considera as regiões ou locais específicos.

**Quadro 2.** Potenciais Efeitos das Mudanças Climáticas sobre a Rede de Rodovias Nacionais

<b>Categoria de Efeito de MC</b>	<b>Risco</b>	<b>Principal Ativo da Estrada ou Operação Afetada</b>	<b>Lacuna na Prática, Conhecimento e Informação</b>
Erosão no interior e instabilidade (incluindo erosão do solo e deslizamento de terra)	Alto	- Inclinação e deslizamento de terra podem causar perturbações na - Operação de estradas devido a bloqueios. - As estradas ao longo de rios têm seu risco aumentado de lavagem e deslizamentos.	- Avaliação geotécnica dos locais existentes e potenciais de deslizamento. - Necessidade de identificar locais em risco em estradas.
Precipitação (incluindo as de alta e média intensidade, águas subterrâneas e umidade do solo)	Alto	- Redução de atrito superficial e risco de acidentes por "perda de controle"; - Potencial de degradação da camada imediatamente após a superfície e da sub-base.	- Outros projetos de superfície disponíveis, mas com custos mais elevados; - Necessidade de identificar áreas de risco.
Inundações (incluindo rio	Alto	- Perturbação na operação da estrada;	- Padrões de projeto de ponte têm

<b>Categoria de Efeito de MC</b>	<b>Risco</b>	<b>Principal Ativo da Estrada ou Operação Afetada</b>	<b>Lacuna na Prática, Conhecimento e Informação</b>
e inundação superficial)		- Danos em drenagem, bueiros e infraestrutura de ponte devido ao aumento dos fluxos de água e detritos.	que levar em conta os efeitos projetados das mudanças climáticas; - Intervalos de inspeção podem precisar ser reduzidos.
Inundações costeiras (incluindo aumento do nível do mar e tempestade)	Alto	- Estradas costeiras em risco devido à elevação do nível do mar e tempestades; - Risco moderado de redução de vida útil da estrutura causado por corrosão.	- Seções identificadas em situação de risco; - Necessidade de identificar novas seções que podem estar em risco no futuro.
Erosão costeira	Alto	- Lavagem da estrada; - Erosão costeira.	- Necessidade de identificar seções de estrada que podem estar em risco no futuro.
Vento forte	Alto	- Risco elevado de veículos serem arrastados em áreas expostas; - Risco moderado de danos às estruturas e restrições temporárias de estradas e pontes.	- Localização e intensidade dos ventos em relação à rede rodoviária.
Nevoeiro e umidade	Alto, mas o verdadeiro risco pode ser moderado	- Aumento de acidentes relacionados ao nevoeiro.	- Comportamento dos condutores; - Monitoramento de nevoeiro e sinais de alerta disponíveis.
Incêndio	Alto, mas o verdadeiro risco pode ser baixo	- Danos aos equipamentos e vegetação; - Interrupção do tráfego na estrada.	Natureza da rede rural.
Relâmpago	Alto, mas o verdadeiro risco pode ser baixo	- Fogos de beira de estrada em condições de seca.	Natureza da rede rural.
Temperatura extrema alta (incluindo a do ar e do solo)	Moderado	- Rompimento superficial do pavimento; - Aumento da poeira das estradas sem pavimento.	- Padrões de projeto de superfície para o clima mais quente; - Como reduzir a poeira usando métodos ambientalmente saudáveis.
Seca (incluindo o baixo fluxo dos rios)	Moderado	- Aumento da poeira das estradas sem pavimento.	- Como reduzir a poeira usando métodos ambientalmente saudáveis.

Fonte: Gardiner *et al.*, 2008

Os principais riscos classificados mencionados como “alto” são detalhados, em seguida.

- Aumento da intensidade da chuva e duração causando deslizamentos e inundações

Os efeitos das chuvas extremas em encostas e inclinações já são identificados como maiores causas de interrupções de estradas. O efeito da chuva sobre a resistência à derrapagem e a ligação entre as chuvas fortes e eventos de inundação são, atualmente, as principais preocupações para os gestores rodoviários, sem os efeitos adicionados da mudança climática. Ativos e operações de estrada estão em alto risco de ruptura relacionadas com os efeitos do clima:

- Um acréscimo na ocorrência de chuvas de 100 anos aumenta a umidade do solo e as águas subterrâneas e/ou aumenta a precipitação média causando mais deslizamentos de terra, que necessitam de reparos, ocasionando o fechamento de estradas por períodos curtos ou prolongados. As consequências potenciais incluem danos ao patrimônio rodoviário, aos usuários e aos transportadores de mercadorias;
- As enchentes e os detritos podem afetar estradas e pontes, exigindo, assim, inspeções mais frequentes, reparos e potenciais interrupções de estrada para limpeza. Exigirão reparos o aumento de áreas de pilares de pontes, proteção de obras ribeirinhas etc.;
- A água de superfície pode levar ao aumento da "perda de controle" e acidentes causados por longos períodos de aderência reduzida;
- Falha de bueiro, no caso de drenagem inadequada, pode levar à lavagem de estrada e fechamento para reparos.
- Risco de inundação costeira e erosão em estradas costeiras

Os efeitos da inundação costeira e erosão em estradas costeiras são difíceis de prever, por causa da complexidade de fatores climáticos e a incerteza sobre as condições meteorológicas costeiras futuras. Para o Conselho do *Ministry for the Environment* (MfE) a mudança climática não irá introduzir novos tipos de perigos costeiros, mas afetará os já existentes por alteração das condições costeiras, como o nível do mar, marés de tempestade, ondas e ondulações.

Em geral, as áreas que estão atualmente sujeitas a riscos costeiros ocasionais são propensas a sofrer aumento dos riscos com um clima mais quente, enquanto que as áreas que estão em um equilíbrio delicado podem começar a incorrer em riscos mais prejudiciais no futuro.

Como resultado da mudança do clima, a infraestrutura rodoviária na zona costeira é susceptível de ser exposta a maiores riscos de inundação e erosão costeira:

- Ondas altas e as condições de tempestade podem lavar estradas, interromper o acesso, exigindo grandes reparações para restaurar as ligações rodoviárias. Potencial de lesões / morte para os usuários;
- Inundação costeira e aumento da elevação do nível do mar podem aumentar a erosão costeira de estruturas, que exigem inspeção e reparos mais frequentes, causando potenciais perturbações;
- Aumento da incursão salina em pontes costeiras pode levar a acelerada deterioração do material.
- Ventos fortes

Um possível aumento nos ventos fortes (> 10 m/s) em até 10% é previsto para 2090.

Os ventos fortes têm potencial para:

- Soprar veículos para fora da estrada em locais expostos, resultando em risco de ferimentos ou morte;
- Danos em sinais e infraestrutura;
- Fechamento temporário de estradas e imposição de restrições a pontes.

#### **2.6.5. Limitações**

O estudo buscou identificar lacunas de conhecimento, prática ou informação que são prioritárias e não prioritárias, em termos de pesquisa climática, legislação, políticas específicas. No que se refere às lacunas prioritárias relacionadas à pesquisa climática, pontuou ser necessário:

- Melhores modelos para prever os parâmetros-chaves do clima, que podem afetar as redes de infraestrutura de transporte. Por exemplo, modelos de radiação solar para determinar os efeitos adversos potenciais sobre componentes de transporte (tais como danos causados por raios ultravioletas ou ganho de calor devido à radiação) não consideram adequadamente a cobertura de nuvens;
- Modelos de alta resolução dos efeitos relevantes para permitir a análise detalhada do território e distribuição temporal dos efeitos das mudanças climáticas;
- Cálculo dos efeitos combinados com fatores climáticos afetados pelas mudanças climáticas em meios de transporte (p. ex., efeitos combinados da elevação do nível do mar, tempestade, marés e ventos fortes nas zonas costeiras);

- Definição mais clara das relações entre os parâmetros climáticos-chaves e infraestrutura de transportes.

Em termos de legislação e política são a falta de:

- Integração global do planejamento de transportes terrestres (rodoviário, ferroviário e navegação costeira) com o planejamento do uso do solo;
- Reconhecimento explícito na legislação e requisitos para considerar os efeitos das mudanças climáticas como parte dos ativos e das responsabilidades de transporte e do gerenciamento de rede;
- Reconhecimento explícito na política estratégica de transporte terrestre e requisitos, de forma a considerar os efeitos das mudanças climáticas como parte das responsabilidades e gerenciamento dos ativos e da rede;
- Clareza sobre os cronogramas adequados de planejamento para assegurar que a decisão relacionada ao transporte, incluindo as prioridades de financiamento, leve em conta os efeitos previstos das mudanças climáticas;
- Definição de responsabilidade para lidar com os efeitos das mudanças climáticas em termos de interesse nacional e regional e fornecedores de infraestrutura local, incluindo o papel do setor privado;
- Processo de auditoria para monitoramento de políticas de adaptação e do progresso em níveis nacional, regional e local.

Para os ativos rodoviários, são as seguintes:

- Mapeamento específico de áreas de risco de inundação costeira / inundação causada pelo aumento do nível do mar e tempestades;
- Avaliação nacional do desempenho de ativos de drenagem, bueiros e estruturas de pontes existentes e melhorias associadas /modernização necessárias para lidar com o aumento do fluxo de água causado pelas mudanças climáticas;
- Tradução do aumento projetado da intensidade e frequência de chuvas sobre a erosão e deslizamentos e identificação de áreas e regiões vulneráveis e em risco de efeitos operacionais ou exigências de adaptação.

Além disso, a fim de analisar os ativos em risco de mudanças climáticas, alguns conjuntos básicos de dados terão de ser melhorados e /ou desenvolvidos, tais como a proximidade de estradas de corpos d'água, elevações acima do nível do mar e referências topológicas numa escala precisa.

## **2.7. Nova Zelândia – *Climate Change Effects on the Land Transport Network – Volume 2: approach to risk management. Gardiner et al. (2008b)***

### **2.7.1. Objetivo**

Esta publicação faz parte do projeto desenvolvido em dois estágios (Volume 1 e 2) que tem os seguintes objetivos:

- Identificar e avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre as redes de transporte terrestre da Nova Zelândia (rodoviário, ferroviário, portos e navegação costeira);
- Formular recomendações, incluindo opções de adaptação, para suprir as lacunas de informação e lidar com os riscos identificados;
- Fornecer informações necessárias sobre adaptação de projeto, operação e manutenção de ativos críticos, com relação aos efeitos das mudanças climáticas antropogênicas, para os fornecedores de infraestrutura de transporte terrestre e formuladores de políticas.

O segundo estágio – *Abordagem para a Gestão do Risco* – lida com uma ampla avaliação de potenciais cenários de mudanças climáticas e de como se relacionam com as redes de transportes em nível nacional, por meio de uma gama de horizontes de tempo e escalas geográficas, com formulação de recomendações de medidas de adaptação, a fim de possibilitar a gestão da mudança climática mais eficaz, além de uma avaliação indicativa de custos. Tais medidas têm sido priorizadas por meio de Análise Multicritério (MCA) e classificadas por tipo:

- Projeto, onde mudanças na concepção da rede de transporte terrestre são propostas;
- Operacional, onde as mudanças no funcionamento da rede são propostas;
- Pesquisa, onde recomendações detalhadas não são possíveis no momento e mais pesquisas serão necessárias;
- Política, onde recomendações afetariam as atuais políticas.

### 2.7.2. Metodologia

A metodologia adotada no segundo estágio pode ser assim resumida:

- Delimitação do escopo a partir das recomendações elaboradas no primeiro estágio, da revisão dos dados e fontes disponíveis em nível nacional, de acordo com a abordagem a ser seguida e metodologia a ser desenvolvida e reuniões de discussões com NZTA (*NZ Transport Agency*);
- Contato direto com stakeholders, ao invés da criação de um grupo formal de trabalho, com os principais parceiros identificados no primeiro estágio, mas também com outras organizações, como a defesa civil, para identificar outras informações relacionadas;
- Avaliação da vulnerabilidade da rede, a partir dos registros de desastres naturais relacionados com o clima e existentes na base de dados NIWA (*National Institute of Water and Atmospheric Research*) / GNS (*Geological Nuclear Sciences*) e registros de eventos que afetam a rede de transporte rodoviário e ferroviário. Os dados foram espacialmente mapeados e sobrepostos às redes em GIS, para fornecer resultado espacial adequado para: identificar a extensão dos ativos atualmente afetados pelas condições climáticas; identificar padrões regionais; e possibilitar o fornecimento de métricas quantitativas dos efeitos. Os critérios de avaliação de vulnerabilidade são: magnitude do impacto, tempo, persistência e irreversibilidade, probabilidade e confiança, potencial de adaptação planejada, distribuição geográfica e importância do sistema vulnerável;
- Modelagem climática composta de cenários de mudança climática centrados em 2040 (2030-2049) e em 2090 (2080-2099). Os cenários foram desenvolvidos utilizando *downloading* estatístico de 12 diferentes modelos de circulação global, para um cenário mediano de emissões de GEE (A1B), para padrões de projeção de mudanças climáticas em escala regional. Previsões de chuvas extremas foram baseadas no modelo do *High Intensity Rainfall Design System* (HIRDS), do NIWA. As informações sobre o nível de elevação do mar e tempestades foram baseadas no manual de orientação costeira do MfE;
- Efeitos das mudanças climáticas sobre infraestruturas de transporte se fundamentaram na identificação da vulnerabilidade atual das redes de transportes para estressores climáticos; nos limiares em relação ao efeito das mudanças climáticas; e na intensificação do efeito em cada cenário. Temperatura extrema foi



utilizada para prever o risco futuro de estresse causado pelo calor nas ferrovias; precipitação extrema foi usada como *proxy* para determinar o aumento do risco de inundações conhecido em áreas baixas (elevação <5m acima do nível do mar), fornecendo base para se destacar partes da rede rodoviária e ferroviária potencialmente vulneráveis à inundação de elevação do nível do mar (falta de uma resolução maior nacional da topografia costeira impediu o refinamento de risco abaixo desse nível);

- A adaptação do sistema de transporte nacional terrestre é descrita com base na literatura disponível e as opções de adaptação identificadas e priorizadas usando MCA.

Observa-se que a avaliação de potenciais cenários e sua relação com a rede de transporte terrestre foi aplicada a três estudos específicos, a partir da priorização dos riscos identificados como de alta prioridade no primeiro estágio:

- Estresse causado pelo calor nas ferrovias: avaliação de cenários de impacto específicos para a rede de transporte ferroviária nacional, causados pela flambagem de trilhos devido a temperaturas/eventos de onda de calor elevados;
- Risco de inundação costeira: identificação de infraestruturas de transporte (estradas, ferrovias e portos) em terras baixas costeiras que são potencialmente mais vulneráveis à inundação costeira devido à elevação do nível do mar e tempestades no mar;
- Risco de inundação no interior: identificação de seções da rodovia estadual e redes ferroviárias atualmente em risco (ou propenso a) de inundações no interior, como base para estimar prováveis riscos de inundação [(utilizando Média de Intervalo Recorrência (ARI)] dessas áreas sob diferentes cenários de mudanças climáticas.

Como o estudo em questão se aplica à infraestrutura rodoviária nacional, o estresse causado pelo calor nas ferrovias não será abordado.

- Estudo de Risco de Inundação Costeira

Este estudo realizou um perfil de risco nacional das redes de transporte rodoviário e ferroviário em relação à inundação resultante do aumento do nível do mar e tempestades, tomando por base as altitudes em relação ao nível médio do mar.

A metodologia compreendeu o mapeamento das áreas costeiras usando dados de elevação costeira de satélite, sobrepondo às redes de transporte e medindo o comprimento em baixa altitude (posição próxima ao nível do mar <5 m de altitude) das redes costeiras (a métrica "de risco"). Uma ampla estimativa de risco foi determinada a partir do comprimento total da rede. O estudo também analisou que corredores costeiros multimodais podem estar em risco de inundação e comparou com o suporte do método LiDAR.

- **Risco de Inundação no Interior**

A metodologia compreendeu a identificação de partes das atuais redes sujeitas a inundações registradas, que estabelece um período de retorno anual (ARI), prevendo o futuro em 2040 e 2090, utilizando um fator de escala e traçando os dados em mapa, com GIS de cada rede.

O método assume que o risco de inundação em um determinado local é proporcional ao aumento das chuvas extremas que, por sua vez, resulta em aumento semelhante no fluxo de pico do rio. Estas hipóteses simplificadoras são aceitáveis para os fins do perfil nacional, embora se note que "quase-acidentes" (ou seja, seções que são susceptíveis de inundar no futuro, mas que não estão atualmente em risco) não são identificadas. A abordagem adotada compreendeu as seguintes etapas:

- Identificação de quais partes das redes atualmente sofrem inundações;
- Instituição da atual ARI para cada evento de inundação usando HIRDS;
- Previsão do futuro ARI (2040 e 2090) para cada localização com base no histórico dos totais de precipitação produtoras de inundação.

### **2.7.3. Variáveis e Indicadores Climáticos**

- **Estudo de Risco de Inundação Costeira**

Considerado o comprimento absoluto e percentual da rede abaixo da elevação de 5 m (comprimento da estrada acima do nível médio do mar). A métrica derivada fornece um indicador de alto nível de risco potencial de inundação costeira e, portanto, identifica as áreas prioritárias.

- **Risco de Inundação no Interior**

Mudança da ARI para cada evento de inundação.

#### 2.7.4. Potenciais Impactos

- Estudo de Risco de Inundação Costeira
- Lavagem de estradas;
  - Interrupção da estrada, exigindo grandes reparações para restaurar as ligações rodoviárias;
  - Potencial de lesões /morte para os usuários da estrada;
  - Aumento da erosão costeira de estruturas, exigindo inspeção e reparos mais frequentes;
  - Aumento da incursão salina em pontes costeiras, levando a acelerada deterioração do material.
- Risco de Inundação no Interior
  - Deslizamento de terra, ocasionando o fechamento de estradas por períodos curtos ou prolongados e conseqüentemente danos ao patrimônio rodoviário, aos usuários e aos transportadores de mercadorias;
  - Aumento da "perda de controle" e acidentes causados por longos períodos de aderência reduzida dos pneus.

#### 2.7.5. Limitações

- Estudo de Risco de Inundação Costeira

Os trabalhos futuros para refinar os riscos das mudanças climáticas para as redes costeiras podem incluir:

- Mapeamento topográfico de alta resolução, usando dados LiDAR e/ou de elevação / ativo;
- Inspeção no local e levantamento das condições dos ativos;
- Modelagem quantitativa de risco em seções prioritárias 'em risco';
- Avaliação da resiliência das defesas marítimas existentes;
- Determinação da vulnerabilidade das redes para outros riscos costeiros, como, por exemplo, deslizamentos e erosão;
- Estudos de risco dos corredores de transporte costeiros.

- Risco de Inundação no Interior

Na época do estudo, o banco de dados de perigos apresentava dificuldades técnicas, que impediram que os dados anteriores a julho de 2008 fossem acessados, por isso foram utilizados os dados de inundação de nível regional. Resumidamente:

- As respostas de 16 das 24 operações registraram inundações que afetaram as rodovias estaduais no passado. Comparação regional não foi possível pela incerteza em como os dados de inundação são relatados e por déficit de dados em cerca de 30% da rede;
- A vulnerabilidade para condições meteorológicas extremas não é bem definida. Enquanto certas partes da rede são vulneráveis a inundações, o perfil de risco de inundação nacional ou estimativa de risco futuro (com base em mudanças na ARI) não pode ser desenvolvido devido à falta de registros adequados de ocorrência de inundações;
- Resposta de adaptação no curto prazo deve se concentrar na coleta sistemática de dados sobre eventos climáticos extremos que causam perturbação/danos à rede e em estudos de riscos de inundações mais detalhados.

Estudos de inundação futura em matéria de mudanças climáticas para as redes rodoviárias estaduais poderiam considerar:

- Modelagem baseada na bacia hidrográfica de zonas propensas a inundações;
- Identificação de seções com riscos de inundação (eventos atuais 'quase acidentes');
- Identificação de ativos de longa vida críticos em risco (pontes e grandes bueiros);
- Triagem de pontes em áreas de risco;
- Avaliação da resistência das defesas contra inundações existentes e revisão das normas de projetos.

- Futuros esforços

Considerando o projeto como um todo, de uma forma geral, pode-se dizer que os futuros esforços devem se concentrar nos seguintes aspectos fundamentais:

- Reduzir as diferenças em dados de transportes: os atuais sistemas de gestão de ativos existentes, em geral, não estão configurados para fornecer informações para auxiliar a previsão dos efeitos das mudanças climáticas sobre as redes.
- Melhor compreensão da vulnerabilidade da rede a condições meteorológicas extremas: a vulnerabilidade para extremos climáticos não está bem documentada e a qualidade e recuperabilidade dos dados varia amplamente. Sistemas mais robustos são necessários para avaliar o significado de eventos climáticos extremos e a variabilidade do tempo no projeto, custo, mobilidade e segurança das redes existentes. Análise dos atuais acontecimentos meteorológicos que afetam os sistemas de transporte auxiliará a futura previsão de efeitos sob as mudanças climáticas;
- Necessidade de relacionar as alterações climáticas com a gestão de ativos: melhor integração da problemática das mudanças climáticas nos programas de gestão dos ativos por parte dos prestadores de serviço (que abrange planejamento, projeto, operação e manutenção), bem como a ligação com iniciativas mais amplas de transporte sustentável (como corredores de transporte prioritários);
- Importância da análise de impacto regional/local: os efeitos que a mudança climática pode ter na infraestrutura de transporte e serviços são muito dependentes do clima regional e características locais, que exige modelagem de escala local de tais efeitos, a fim de fornecer a base para respostas de adaptação custo-efetivas. Modelos climáticos de alta resolução regional e sub-regional podem apoiar a integração de dados específicos;
- Necessidade de melhores ferramentas de análise de risco: os planejadores de transporte também precisam de novas ferramentas face às incertezas que são inerentes a projeções de mudanças climáticas. Tais métodos são susceptíveis de ser quantitativos, com base numa estrutura probabilística, com maior clareza sobre a incerteza para o usuário final da gestão de risco. Dado o longo horizonte de mudanças climáticas (50-100 anos), fatores como a mudança de demografia, uso do solo e tecnologia devem ser levados em conta no modelo de análise do risco;
- Abordagem integrada do planejamento dos transportes: o estudo forneceu uma análise inicial de onde as alterações climáticas (p. ex., os riscos de cheias e inundações costeiras) poderiam afetar partes de redes de transportes individuais. Estudos futuros precisam considerar mudanças climáticas no contexto de uma rede de transportes integrada;

- Avaliação econômica mais robusta: uma avaliação mais ampla do custo econômico das mudanças climáticas sobre o transporte de superfície é necessária, uma vez que o cálculo do verdadeiro impacto econômico é repleto de custos "escondidos". Além do valor da infraestrutura de substituição, outros custos reais incluem mudança de itinerário de tráfego; dias de trabalho e produtividade perdidos; a oferta de abrigo e mantimentos temporária; e custos potenciais de realocação e requalificação profissional.

## 2.8. Síntese dos estudos

O Quadro 3 sintetiza os principais pontos destacados de cada estudo analisado, considerando as etapas de planejamento, construção, operação e manutenção da infraestrutura de transporte rodoviário, as variáveis e indicadores climáticos adotados, os impactos potenciais elencados e as limitações impostas à realização dos estudos, incluindo a identificação de lacunas de conhecimento, informação ou prática.

Observa-se que a gama de indicadores climáticos adotados pelos estudos é distinta e é função, dentre outros, da disponibilidade de dados e dos objetivos a serem atendidos. Já os impactos potenciais desencadeados também são diversos, considerando as diferentes etapas que envolvem o desenvolvimento de um projeto de infraestrutura de transportes, desde o seu planejamento até sua operação e manutenção, mas basicamente se repetem, de acordo com as categorias de efeitos das mudanças climáticas as quais se relacionam.

**Quadro 3.** Quadro síntese com as informações da revisão da literatura internacional

Estudo	Região	Etapas	Variáveis Climáticas	Indicadores Climáticos	Impacto Potencial	Limitações
Nemry, F. & Demirel, H. (2012)	União Europeia (UE)	P; C; M	• Temperatura (estresse calor)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 7 dias com temperaturas máximas nos pavimentos;</li> <li>• Número de dias que excedam os limiares considerados críticos para o transporte ferroviário de risco de flambagem.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degradação do pavimento das rodovias;</li> <li>• Danos às pontes com correntezas;</li> <li>• Inundações temporárias ou permanentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitação de dados climáticos e modelos de projeções climáticas de indicadores de extremos climáticos (precipitação);</li> <li>• Incertezas e ausência de dados do próprio sistema de transporte;</li> <li>• Ausência de dados de eventos/danos ocorridos ou dificuldade de acesso;</li> <li>• Ausência de evidências sobre custos de adaptação;</li> <li>• Classificação errônea de desastres e danos;</li> </ul>
			• Precipitação (precipitação extrema e alagamentos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pontes expostas a 20% – 40% de aumento no vazão dos rios, em 100 anos;</li> <li>• Infraestruturas costeiras com risco de inundação.</li> </ul>		
D., Smart, J., Byfield, J., Oldfield, S., Allan, S., Kouvelis, B., Tait, A., Clark, A. (2008)	Nova Zelândia	P;O;M	• Temperatura média e extrema	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alterações projetadas na temperatura anual (em ° C);</li> <li>• Aumento previsto no número de dias com uma temperatura máxima do ar superior a 25 ° C.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inclinação e deslizamento de terra podem causar perturbações na operação de estradas devido a bloqueios;</li> <li>• Lavagem da pista e deslizamentos;</li> <li>• Redução de atrito superficial e risco de acidentes por "perda de controle";</li> <li>• Potencial de degradação da camada imediatamente após a superfície e da sub-base;</li> <li>• Perturbação na operação da estrada;</li> <li>• Danos em drenagem, bueiros e infraestrutura de ponte devido ao aumento dos fluxos de água e detritos;</li> <li>• Redução de vida útil da estrutura causada por corrosão;</li> <li>• Erosão das defesas costeiras;</li> <li>• Veículos serem arrastados de estradas;</li> <li>• Danos às estruturas e restrições temporárias de fechamento de estradas e pontes; Aumento de acidentes relacionados ao nevoeiro;</li> <li>• Exposição a eventos repentinos – nevasca, chuva de granizo;</li> <li>• Aumento da neve derretida contribuindo para problemas de inundação;</li> <li>• Danos aos equipamentos e vegetação causados por incêndios na estrada;</li> <li>• Interrupção n o tráfego da estrada devido a incêndios;</li> <li>• Sangramento superfície do pavimento;</li> <li>• Aumento da poeira das estradas sem pavimento;</li> <li>• Aumento do número de defeitos de superfície em função do aumento em ciclos de gelo-degelo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lacuna nos modelos climáticos e também nos modelos de análise de impacto das mudanças climáticas no território.</li> <li>• Falta de definição mais clara entre os parâmetros climáticos-chaves e infraestrutura de transporte (dose-resposta);</li> <li>• Necessidade de modelos climáticos de alta resolução para permitir a análise detalhada do território e distribuição temporal dos efeitos;</li> <li>• Banco de dados parcialmente completo e/ou desenvolvido de ativos de estrada;</li> <li>• Ausência de mapeamento específico de áreas de risco de inundação costeira / inundação causada pelo aumento do nível do mar e tempestade (<i>storm surge</i>);</li> <li>• Ausência de avaliação nacional do desempenho de ativos de drenagem, bueiros e estruturas de pontes existentes;</li> <li>• Ausência de cálculo dos efeitos combinados de fatores climáticos afetados pelas mudanças climáticas em meios de transporte.</li> </ul>
			• Precipitação média e extrema	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alterações projetadas na precipitação anual ( %);</li> <li>• Aumento previsto em 24 horas com 100 anos ARI (<i>Average Recurrence Interval – Intervalo Médio de Recorrência</i>) de precipitação total;</li> </ul>		
			• Seca	• A atual seca de um em 20 anos.		
			• Neve e neve eterna	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frequência e intensidade de queda de neve e alteração da linha de neve perpétua;</li> <li>• Frequência e intensidade de queda de neve e alteração da linha de neve perpétua.</li> </ul>		
			• Vento médio e extremo	• Alteração (em %) em 99 percentil na velocidade do vento de 10 m/s (velocidade do vento diária que excede somente 1% do tempo) na temporada de inverno.		

Estudo	Região	Etapas	Variáveis Climáticas	Indicadores Climáticos	Impacto Potencial	Limitações
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Elevação do nível do mar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elevação do nível do mar de 0,2 m e 0,5 m.</li> </ul>		
Gardiner, L., Firestone, D., Osborne, A., Kouvelis, B., Clark, A., Tait, A. (2009)	Nova Zelândia	P;O;M	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elevação do nível do mar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Comprimento absoluto e percentual da rede abaixo da elevação de 5 m.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lavagem de estradas;</li> <li>Interrupção da estrada, exigindo grandes reparações para restaurar as ligações rodoviárias;</li> <li>Potencial de lesões /morte para os usuários da estrada;</li> <li>Aumento da erosão costeira de estruturas, exigindo inspeção e reparos mais frequentes;</li> <li>Aumento da incursão salina em pontes costeiras, levando a acelerada deterioração do material.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ausência de mapeamento topográfico de alta resolução de elevação/ativo.</li> <li>Falta de dados atualizados das condições dos ativos;</li> <li>Incertezas na metodologia de relato de dados de inundação estadual e déficit de dados;</li> <li>Ausência de dados de vulnerabilidade da malha rodoviária estadual frente a extremos;</li> <li>Falha na identificação de ativos em risco (pontes e bueiros);</li> <li>Ausência de modelagem baseada na bacia hidrográfica de zonas propensas a inundações;</li> <li>Ausência de avaliação da resistência das defesas contra inundações.</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Precipitação Extrema</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mudança da ARI para cada evento de inundação.</li> </ul>		
Cochren (2009)	França	O; P	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aumento na radiação solar;</li> <li>Aumento na temperatura e nas ondas de calor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aumento na temperatura relacionado ao desgaste das infraestruturas, tal como pavimento, fundação, danos relacionados ao fogo e também aumento no número de queimadas no entorno;</li> <li>Aumento no custo de manutenção;</li> <li>Impacto adversos em diferentes setores econômicos correlacionados com transporte e as alterações climáticas (exemplo, turismo e agricultura).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ausência de dados do sistema de transporte para uma análise específica de infraestruturas;</li> <li>Dados dispersos entre diferentes instituições;</li> <li>Ausência de informações detalhadas dos modelos climáticos;</li> <li>Necessidade de um maior entendimento e quantificação das incertezas dos modelos climáticos.</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Precipitação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diminuição da umidade;</li> <li>Diminuição na variação em períodos de seca e chuva.</li> </ul>		
Austroad (2004)	Austrália	O; P	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura máxima e mínima;</li> <li>Temperatura média;</li> <li>Radiação solar máxima e mínima;</li> <li>Radiação solar média;</li> <li>Evaporação potencial e atual.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Impacto na estrutura do pavimento (umidade);</li> <li>Impacto na performance do pavimento (temperatura);</li> <li>Deterioração do pavimento;</li> <li>Necessidade de manutenção do pavimento;</li> <li>Alteração no padrão populacional.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limitação do escopo por ausência de dados – não foram feitas análises sobre todas as estradas por conta da ausência de dados;</li> <li>Limitação orçamentária não podendo ser desenvolvido o estudo da forma planejada. Como por exemplo, desagregação de algumas informações, análises de estratégias de manutenção e a avaliação dos extremos climáticos;</li> <li>Necessidade de um maior entendimento e quantificação das incertezas dos modelos climáticos.</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Precipitação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Precipitação máxima e mínima;</li> <li>Precipitação média.</li> </ul>		
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Elevação do nível do mar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elevação do nível do mar.</li> </ul>		



Estudo	Região	Etapas	Variáveis Climáticas	Indicadores Climáticos	Impacto Potencial	Limitações
FHWA (2012)	EUA	P;O;M	• Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperaturas mínimas, máximas e médias anuais, mensais e sazonais;</li> <li>• Máxima temperatura do ar em intervalos de 7 dias;</li> <li>• Temperaturas máximas diárias: médias, 50%, 95%, dia mais quente do ano durante cada período de 30 anos;</li> <li>• Número de dias por ano com altas temperaturas;</li> <li>• Número máximo de dias consecutivos com temperaturas acima de 35°C, 37,7°C, 40,5°C e 43,3°C;</li> <li>• Média de temperaturas máximas diárias em mais de quatro dias seguidos no verão;</li> <li>• Média, 5%, 25%, 50%, 75%, 95%, outliers de temperaturas mínimas em mais de quatro dias no inverno;</li> <li>• Média, 50%, 90%, 95%, e 99% ocorrência de dias mais frios de um ano durante o período de 30 anos;</li> <li>• Média de 7 dias de temperatura máxima por ano com probabilidade de ocorrência durante cada período de 30 anos (média, 50%, 90%, 95%, 99%);</li> <li>• Temperaturas mínimas, máximas e médias anuais, mensais e sazonais;</li> <li>• Máxima temperatura do ar em intervalos de 7 dias;</li> <li>• Temperaturas máximas diárias: médias, 50%, 95%, dia mais quente do ano durante cada período de 30 anos;</li> <li>• Número de dias por ano com altas temperaturas;</li> <li>• Número máximo de dias consecutivos com temperaturas acima de 35°C, 37,7°C, 40,5°C e 43,3°C;</li> <li>• Média de temperaturas máximas diárias em mais de quatro dias seguidos no verão;</li> <li>• Média, 5%, 25%, 50%, 75%, 95%, outliers de temperaturas mínimas em mais de quatro dias no inverno;</li> <li>• Média, 50%, 90%, 95%, e 99% ocorrência de dias mais frios de um ano durante o período de 30 anos;</li> <li>• Média de 7 dias de temperatura máxima por ano com probabilidade de ocorrência</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento da expansão térmica das juntas de dilatação de pontes e superfícies pavimentadas, causando possível degradação;</li> <li>• Preocupações quanto a integridade do pavimento e migração de asfalto líquido, aumentando a necessidade de manutenção;</li> <li>• Limitação dos períodos de atividade de construção, e maior sobrecarga de trabalho noturno;</li> <li>• Superaquecimento de veículos e degradação acelerada dos pneus;</li> <li>• Pressão sobre os custos de manutenção e construção de estradas e pontes;</li> <li>• Maior estresse na integridade de pontes, expansão das juntas de concreto, aço, asfalto, revestimento de proteção e selantes;</li> <li>• Degradação do asfalto, resultando em possíveis paralisações temporárias de tráfego ou aumento do congestionamento de rodovias durante o reparo.</li> <li>• Mudanças nos custos de remoção de neve e gelo e impactos ambientais do uso de sal e substâncias químicas;</li> <li>• Menores restrições relacionadas dos trabalhadores de manutenção com o frio.</li> <li>• Mudanças nas restrições sazonais de peso;</li> <li>• Mudanças nas necessidades sazonais de combustível;</li> <li>• Melhoria da mobilidade e segurança associada a uma redução no tempo do inverno;</li> <li>• Temporada de construção mais longa em zonas mais frias.</li> <li>• Aumento na ocorrência de atrasos e interrupções de trânsito relacionados ao clima;</li> <li>• Aumento na ocorrência de inundações nas rotas de evacuação;</li> <li>• Aumento na ocorrência de alagamento em estradas e túneis;</li> <li>• Aumento da ocorrência de deslizamentos de terra danificando estradas;</li> <li>• Sistemas de drenagem mais susceptíveis à sobrecarga maior frequência e severidade, causando inundações;</li> <li>• Áreas onde as inundações já são comuns podem enfrentar problemas mais graves e frequentes.</li> <li>• Se os níveis de umidade do solo tornarem-se demasiadamente elevados, a integridade estrutural de estradas, pontes e túneis pode estar comprometida;</li> <li>• Água parada pode provocar efeitos adversos na estrutura da estrada;</li> <li>• O aumento da vazão de pico pode afetar o dimensionamento de pontes e bueiros;</li> <li>• Aumento da susceptibilidade à incêndios florestais, causando fechamento temporário;</li> <li>• Aumento do risco de desmoronamento de áreas desmatadas pelo fogo;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A disponibilidade de informações tende a ser um fator limitante para a inclusão de ativos no escopo do estudo.</li> </ul>

Estudo	Região	Etapas	Variáveis Climáticas	Indicadores Climáticos	Impacto Potencial	Limitações
				durante cada período de 30 anos (média, 50%, 90%, 95%, 99%);	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Benefícios para segurança e redução de interrupções se neve se tornar chuva;</li> <li>• Aumento do risco de inundações, deslizamentos de terra e danos às estradas se precipitação muda de neve para chuva na primavera;</li> <li>• Degradação, insuficiência e substituição de estruturas viárias devido ao aumento de movimentos de terra e mudanças nos reservatórios de águas subterrâneas;</li> </ul>	
			• Precipitação extrema	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Probabilidade de precipitações acima da média para 24 horas segundo as probabilidades de 0.2%, 1%, 2%, 5%, 10%, 20%, e 50% eventos extremos (p.ex. 1/500 anos, 1/100, 1/50);</li> <li>• Probabilidade de chuvas (24 horas) que ultrapassem os eventos de ocorrência 0.2%, 1%, 2%, 5%, 10%, 20%, e 50% nos valores atuais;</li> <li>• Probabilidade de chuvas (4 dias consecutivos) que ultrapassem os eventos de ocorrência 0.2%, 1%, 2%, 5%, 10%, 20%, e 50% nos valores atuais. O mesmo para chuvas de 2 dias;</li> <li>• Taxa de ocorrência média anual de chuvas que excedem 1", 2" e 4" por dia;</li> <li>• Maiores precipitações de 3 dias para cada estação do clima.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento dos custos de manutenção e reposição de infraestruturas rodoviárias;</li> <li>• Perda de curto prazo do acesso às rodovias ou o aumento do congestionamento em trechos de rodovias.</li> <li>• Evacuações de emergência mais frequentes e potencialmente mais duradouras;</li> <li>• Mais detritos nas estradas, interrompendo viagens e transporte;</li> <li>• Obras de arte e outras estruturas altas correm o risco de alta velocidade do vento;</li> <li>• Maior ameaça à estabilidade dos tabuleiros de pontes;</li> <li>• Diminuição do tempo esperado de vida útil de rodovias expostas à tempestade;</li> <li>• Risco de inundação imediato, danos causados por força da água e danos secundários causados por colisões com detritos;</li> <li>• Erosão de rodovias costeiras e de áreas de proteção à infraestrutura costeira;</li> <li>• Danos aos sinais, iluminação e suportes;</li> <li>• Redução da taxa de drenagem de terras de baixa altitude depois chuvas e inundações;</li> </ul>	
			• Eventos extremos	• Aumento das estiagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplifica os efeitos de tempestades, causando interrupções mais frequentes em estradas costeiras e de baixa altitude devido aos temporais; • Inundação permanente de rodovias ou vicinais baixas e nas zonas costeiras. Reduz opções de rotas;</li> </ul>	
			• Precipitação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precipitação média anual, mensal e sazonal;</li> <li>• Total de precipitação 2-dias e 4-dias que ultrapassem as probabilidades das ocorrências médias atuais;</li> <li>• Máximo de precipitação acumulada por 5-dias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inundações mais frequentes ou severas de túneis subterrâneos e infraestrutura de baixa altitude;</li> <li>• Na medida em que o nível do mar sobe, a linha costeira</li> </ul>	

Estudo	Região	Etapas	Variáveis Climáticas	Indicadores Climáticos	Impacto Potencial	Limitações
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Elevação do nível do mar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elevação do nível do mar</li> </ul>	<p>mudará e rodovias que antes não estavam sob risco de tempestades ou ondas podem estar expostas futuramente;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Erosão na base das estradas e nas sustentações de pontes;</li> <li>Taludes da estrada sob risco de subsidência;</li> <li>Redução da depuração de sedimentos sob pontes;</li> <li>Aumento dos custos de manutenção e reposição de túneis.</li> </ul>	
HACCRA (2011)	Reino Unido	P;C;O;M	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura média</li> <li>Aumento da temperatura máxima</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dificuldade para reflorestamento e regime de manutenção;</li> <li>Menor necessidade para definir sinais de aviso de emergência;</li> <li>Redução na manutenção de inverno;</li> <li>Impacto visual;</li> <li>Maior visibilidade;</li> <li>Maior segurança;</li> <li>Ameaça à integridade do pavimento;</li> <li>Usuários afetados pela manutenção/ renovações questão das obras/ mudanças no bem-estar para os usuários;</li> <li>Aumento de neve nas rodovias;</li> <li>Acúmulo de água na estrada (aquaplanagem/ segurança/ interrupção das operações;</li> <li>Qualidade das águas;</li> <li>Integridade das estruturas e sinalização;</li> <li>Fechamento de estruturas expostas;</li> <li>Inundações costeiras;</li> <li>Restrição do acesso às estradas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Necessidade de um maior entendimento e quantificação das incertezas dos modelos climáticos;</li> <li>Há grandes incertezas quanto à futura demanda por transportes e estradas, especialmente em longo prazo.</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Precipitação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aumento da precipitação no inverno</li> <li>Redução das chuvas no verão</li> </ul>		
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Eventos extremos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aumento da velocidade do vento</li> </ul>		
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Elevação do nível do mar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elevação do nível do mar</li> </ul>		

Fonte: Elaboração própria

### 3. DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS PARA O BRASIL

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*).

Conceitualmente, o perigo está associado à manifestação de fenômenos hidrometeorológicos intensos e extremos de temperatura, incluindo ondas de calor, em limiares pré-definidos, abaixo ou acima dos quais poderão ocorrer danos físicos à infraestrutura rodoviária. Tais fenômenos climáticos e respectivos limiares dizem respeito a índices climáticos extremos relacionados à precipitação e temperatura.

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.”

Ademais, é necessário realizar a caracterização climática histórica, atual e futura do Brasil, considerando as tendências observadas atualmente para as variáveis climáticas escolhidas como de maior influência para o estudo – precipitação e temperatura – por zona climática (*sensu* IBGE, 2014), para posterior comparação com as projeções do clima futuro.

#### 3.1. Identificação das Variáveis Climáticas Relevantes

O presente estudo tem como foco a análise dos padrões de construção de dispositivos de drenagem e pavimentos asfálticos do sistema rodoviário nacional e as variáveis climáticas de interesse serão aquelas relacionadas à precipitação e à temperatura, com base nas evidências apresentadas na revisão da literatura.

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, o presente estudo terá por base a análise das regiões brasileiras onde tais variáveis sofrerão alterações significativas, de acordo com modelos climáticos já estabelecidos.

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

se dizer que uma elevação de grande magnitude pode provocar inundações e danos na estrutura do pavimento. Por outro lado, uma redução significativa pode provocar obstrução de tais dispositivos, dada a menor capacidade de garantir sua autolimpeza.

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. Para isso, a nomenclatura brasileira, com base no ensaio de penetração, será relacionada à nomenclatura especificada pelo método norte-americano SUPERPAVE, que diz respeito à temperatura de projeto do asfalto. Tal relacionamento terá como base o estudo de Marques & Santos (2009).

É importante salientar que existem outros fatores que podem implicar na interrupção do tráfego nas rodovias e que não serão abordados no presente estudo. Como já mencionado, a elevação do nível médio dos mares 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.

A seguir serão apresentadas as considerações sobre precipitação e temperatura em projetos construtivos de drenagem e de pavimento asfáltico de rodovias.

### 3.1.1. Precipitação

A drenagem de estradas visa conduzir as ocorrências d'água para proporcionar segurança ao tráfego, estabilidade à obra e às alterações impostas ao solo pela mesma. Dependendo da origem da água há um dispositivo adequado para o seu controle. O Quadro 4 apresenta essa relação.

**Quadro 4.** Dispositivos de drenagem mais adequados

Origem	Tipo de Drenagem	Obras de Arte Correntes e Especiais	Local de Aplicação
Precipitação	Superficial	Sarjeta; valeta; entrada e descida d'água; caixas; dissipador de energia; bueiro de greide.	Offset; talude e às margens da via.
	Subsuperficial	Base drenante; dreno raso longitudinal; lateral de base e transversal.	Pavimento.
Lençol Freático	Subterrânea ou Profunda	Dreno longitudinal profundo; espinha de peixe; colchão drenante; dreno vertical e valetão lateral.	Terraplenagem.
		Dreno subhorizontal	Talude, Túnel e Muro de Arrimo.
Curso de água	Transposição de Talvegue	Bueiro.	Linha de Talvegue.
		Ponte e pontilhão.	

Fonte: Adaptado de Diogo (2014)

O presente estudo não abordará a variação do nível do lençol freático, tendo em vista o elevado grau de incerteza associado a tal parâmetro. Será verificado, quando possível, o dimensionamento de dispositivos destinados à drenagem de águas superficiais oriundas de precipitação, além de dispositivos de transposição de cursos de água.

Ao dimensionar a seção de qualquer dispositivo de drenagem calcula-se a sua capacidade hidráulica e verifica-se a velocidade do fluxo d'água. Esta deve ser inferior a uma máxima, capaz de provocar abrasão ao material condutor ou erosão ao solo, e superior a uma mínima, para provocar a autolimpeza. Caso seja uma velocidade inadmissível poderão ser estudadas ações como: alterar a declividade do canal; a seção transversal; a textura do revestimento; empregar material mais resistente; ou construir um sistema dissipador de energia.

A drenagem de estradas lida principalmente com projetos-tipos, definidos em álbuns de órgãos e disponíveis no mercado. Sua escolha se baseará no custo, prazo, disponibilidade, resistência a esforços, estabilidade obra-terreno e na capacidade hidráulica do dispositivo de drenagem.

As três metodologias básicas de cálculo da vazão de projeto concentram-se na bacia hidrográfica ou na disponibilidade de dados fluviométricos históricos. Para dispositivos pequenos, referentes a pequenas áreas de contribuição, usa-se o método racional; para bueiros, pontes e pontilhões, depende da grandeza da bacia hidrográfica e/ou da disponibilidade de séries históricas. O Quadro 5 resume os principais métodos de cálculo da vazão de projeto.

**Quadro 5.** Métodos de cálculo da vazão de projeto de dispositivos de drenagem rodoviária

Método	Base da Função	Circunstância	Bacia Típica	Obra Típica
Indireto	Chuva e área da bacia.	Não é possível/apropriado obter a vazão máxima pelo método estatístico.	Pequena: plataforma de estrada, pátio e talude.	Obras correntes; drenos profundos e subsuperficiais.
Estatístico	Distribuição de probabilidade da vazão máxima.	Há dados históricos suficientes e confiáveis. O uso e a ocupação do solo estão inalterados.	Média a Grande: de córrego, rio ou lago.	Bueiro, ponte e pontilhão.
Empírico	Área da bacia e coeficientes empíricos sobre índice pluviométrico e características geográficas, topográfica e de cobertura vegetal	Não é adequado a uma região distinta de onde foi gerada a fórmula.	Específica.	Obras correntes, bueiro, ponte e pontilhão.

Fonte: Adaptado de Diogo (2014)

A chuva de projeto é a de intensidade máxima. No método indireto ou racional tem a duração do tempo de concentração (tempo transcorrido desde o início da chuva até que cada ponto da bacia contribua com o escoamento superficial na seção de controle), e sua frequência é de uma vez no Período de Retorno, um Tempo de Recorrência (tempo que o evento leva para se repetir) correspondente ao risco admitido para a obra. A equação, a seguir, apresenta o cálculo da vazão de projeto pelo método racional:

$$Q = 0,278 * C * i * A$$

Onde:

C: coeficiente de escoamento superficial;

I: intensidade da chuva em milímetros por hora;

A: área da bacia.

O método estatístico consiste em obter matematicamente o valor da chuva que se repete de acordo com o tempo de recorrência, exigido para a obra de arte especial ou corrente, que se pretende dimensionar, de posse da série histórica de precipitação de uma determinada região.

Os métodos empíricos, pela pouca precisão que possuem, não serão abordados.

Dessa forma, pode-se dizer que face às mudanças climáticas, o método estatístico não apresenta serventia, já que a base de dados conterà dose elevada de incerteza. Os métodos empíricos, desenvolvidos de maneira a serem empregados em bacias específicas, deverão passar por profunda e criteriosa revisão. E o método racional poderá permanecer em utilização, desde que se tenham os devidos cuidados com o cálculo da intensidade pluviométrica.

As precipitações são normalmente registradas ao dia e para obter a chuva máxima para um período menor usam-se os coeficientes de desagregação (Quadro 6).

**Quadro 6.** Desagregação da intensidade pluviométrica diária

Duração	Coeficiente	Duração	Coeficiente
1dia	1,14	30min/1h	0,74
12h/24h	0,85	25min/30min	0,91
10h/24h	0,82	20min/30min	0,81
8h/24h	0,78	15min/30min	0,70
6h/24h	0,72	10min/30min	0,54
1h/24h	0,42	5min/30min	0,34

Fonte: DAEE/CETESB (1980)

Dessa forma, de posse da máxima precipitação anual em um dia, a ser estimada em face das alterações climáticas, pretende-se determinar, por aproximação, um valor a ser utilizado para a intensidade da chuva em milímetros por hora. Assim, será possível realizar a verificação da magnitude da chuva de projeto adotada atualmente e aquela que deverá ser utilizada em face das alterações do clima. Tal análise permitirá concluir se os dispositivos de drenagem adotados nas rodovias serão capazes de suportar a precipitação prevista para aquela localidade.

Ainda em relação à determinação da intensidade a ser adotada para o cálculo da chuva de projeto, pretende-se comparar o valor da precipitação máxima anual em um dia, com aquele verificado para a precipitação máxima anual em cinco dias consecutivos. Será adotado, em favor da segurança, o maior índice encontrado.

Portanto, a análise da precipitação será realizada com o objetivo de reconhecer as áreas do País onde serão sentidas as maiores alterações no padrão da precipitação e, nesses locais, serão realizadas observações nos padrões de projetos utilizados, para que seja possível julgar a necessidade de redimensionamento de dispositivos de drenagem.

### **3.1.2. Temperatura**

O IPR/DPP/DNIT (2004) indica as seguintes causas, mais frequentes e prováveis, para danos em pavimentos flexíveis e semiflexíveis: cargas de tráfego; umidade na superfície e nas camadas do pavimento e do subleito; variação da temperatura ambiente e do próprio pavimento; condições inerentes aos materiais empregados e a forma como foram empregados; e combinações diversas dos fatores elencados. Dentre tais fatores, merecem maior atenção aqueles que poderão sofrer alteração oriunda das modificações do clima. São eles: umidade e temperatura. A variável umidade diz respeito à precipitação local e já foi abordada.

As variações de temperatura, em conjunto com os fatores mencionados, podem provocar diversos danos nos pavimentos. No entanto, as diversas causas de deterioração dos pavimentos podem variar, em grau e em intensidade de cada fator, conforme zona climática considerada e para cada trecho analisado. Cabe ressaltar que os danos abordados podem ser englobados nas seguintes categorias básicas:

- Trincamento (fissuras de todos os tipos e origens);



- Desintegração (painéis, remendos, erosão de bordo, deslocamento de camadas selantes e desagregação);
- Deformações permanentes de distintas etiologias: afundamentos localizados e nas trilhas de rodas;
- Ondulações, corrugações e depressões;
- Desgaste superficial (perda de macrotextura, arrancamento da película de asfalto com exposição de agregados graúdos, polimento de agregados);
- Outros defeitos não enquadráveis nas categorias citadas (tais como, exsudações, segregação e espelhamento).

Tendo em vista que a maior parte das rodovias brasileiras é composta por pavimentos executados com Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), cabe verificar os efeitos da variação de temperatura provocados pelas alterações climáticas nesse tipo de revestimento.

As misturas asfálticas produzidas a quente são formadas por uma adequada união de agregados, cimento asfáltico e vazios. O desempenho das misturas asfálticas está diretamente ligado às características e quantidades desses materiais que a compõem. O CAP tem a função precípua de ser o aglutinante do esqueleto mineral formado pelos agregados. Por ser um material viscoelástico, tem um comportamento de fluido viscoso sob alta temperatura e comportamento de um sólido elástico, sob baixa temperatura. Em virtude dessa característica, a variação de temperatura é um fator de grande importância e deve ser levada em consideração nos projetos de misturas asfálticas.

A classificação atual dos cimentos asfálticos brasileiros é tomada com base no ensaio de penetração e os CAP são classificados em CAP 30/45; CAP 50/70; CAP 85/100 e CAP 150/200. A penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, por 5 segundos, a temperatura de 25 °C (Bernucci *et al*, 2008). Tal denominação não faz referência alguma às temperaturas máximas e mínimas que o material irá suportar. Os CAP mais utilizados no Brasil são o CAP 30/45 e o CAP 50/70.

Entretanto, o método SUPERPAVE, elaborado nos Estados Unidos, apresenta o Grau de Desempenho (*Performance Grade*) do pavimento, cuja nomenclatura indica suas temperaturas de projeto. O Grau de Desempenho é representado por dois números (PG 64+10, p. ex.), em que o primeiro número (64) representa a temperatura máxima do período, em graus Celsius, e o segundo

número (+10) representa a temperatura mínima do período, também em graus Celsius. O sinal positivo do segundo número do exemplo garante que a temperatura mínima da região não ultrapasse 10 °C. Se o sinal for negativo indica temperatura mínima abaixo de 0 °C.

A determinação das temperaturas deve ser realizada tomando-se a média da temperatura do ar dos 7 dias consecutivos mais quentes e a temperatura mais fria de cada ano, em um período suficientemente longo de tempo, consultando-se o banco de dados disponível. Após a definição das temperaturas máximas e mínimas do ar no período, calcula-se a temperatura máxima e mínima do pavimento, que serão usadas na determinação do Grau de Desempenho do ligante asfáltico, por meio das equações a seguir:

#### Temperatura máxima do pavimento

$$T_{Máx} = 32,7 + 0,837 * T_{MáxAr} - 0,0029 * Lat^2 + z * (\sigma^2 + \delta_{modelo}^2)^{0,5}$$

Onde:

$T_{MAX}$ : temperatura máxima do pavimento a 20 mm de profundidade (°C);

$T_{MAXar}$ : Temperatura máxima do ar;

Lat: latitude;

z: confiabilidade;

$\sigma$ : desvio padrão da temperatura mínima do ar no ano (°C);

$\delta_{modelo}$ : erro padrão do modelo = 2,1 °C.

A definição da temperatura mínima do pavimento é dada pela seguinte expressão:

$$T_{Mín} = 0,859 * T_{MínAr} + 1,7$$

Onde:

$T_{MIN}$ : temperatura mínima do pavimento (°C);

$T_{MINar}$ : Temperatura mínima do ar (°C);

Marques e Santos (2009) estabelecem a seguinte relação entre a nomenclatura de asfaltos brasileira e o Grau de Desempenho norte-americano, retratada no Quadro 7.

**Quadro 7.** Relação entre as nomenclaturas adotadas no Brasil e o método SUPERPAVE Norte-Americano

CAP (Brasil)	PG SUPERPAVE (EUA)
CAP 30/45	PG 64-22 ou PG 70-16, de acordo a refinaria
CAP 50/70	PG 58-16, PG 58-22, PG 64-16 ou PG 64-22, também dependendo da refinaria.

Fonte: Adaptado de Marques e Santos (2009)

De posse dessa relação, bem como das áreas suscetíveis à significativa variação de temperatura e do tipo de pavimento asfáltico, adotado nas rodovias situadas nas zonas climáticas, será possível determinar se, face às mudanças climáticas, aquelas rodovias estarão sujeitas a maior incidência dos danos constatados pelo estudo do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (2004).

### 3.2. Caracterização Climática Histórica, Atual e Futura

#### 3.2.1. Climatologia do Brasil

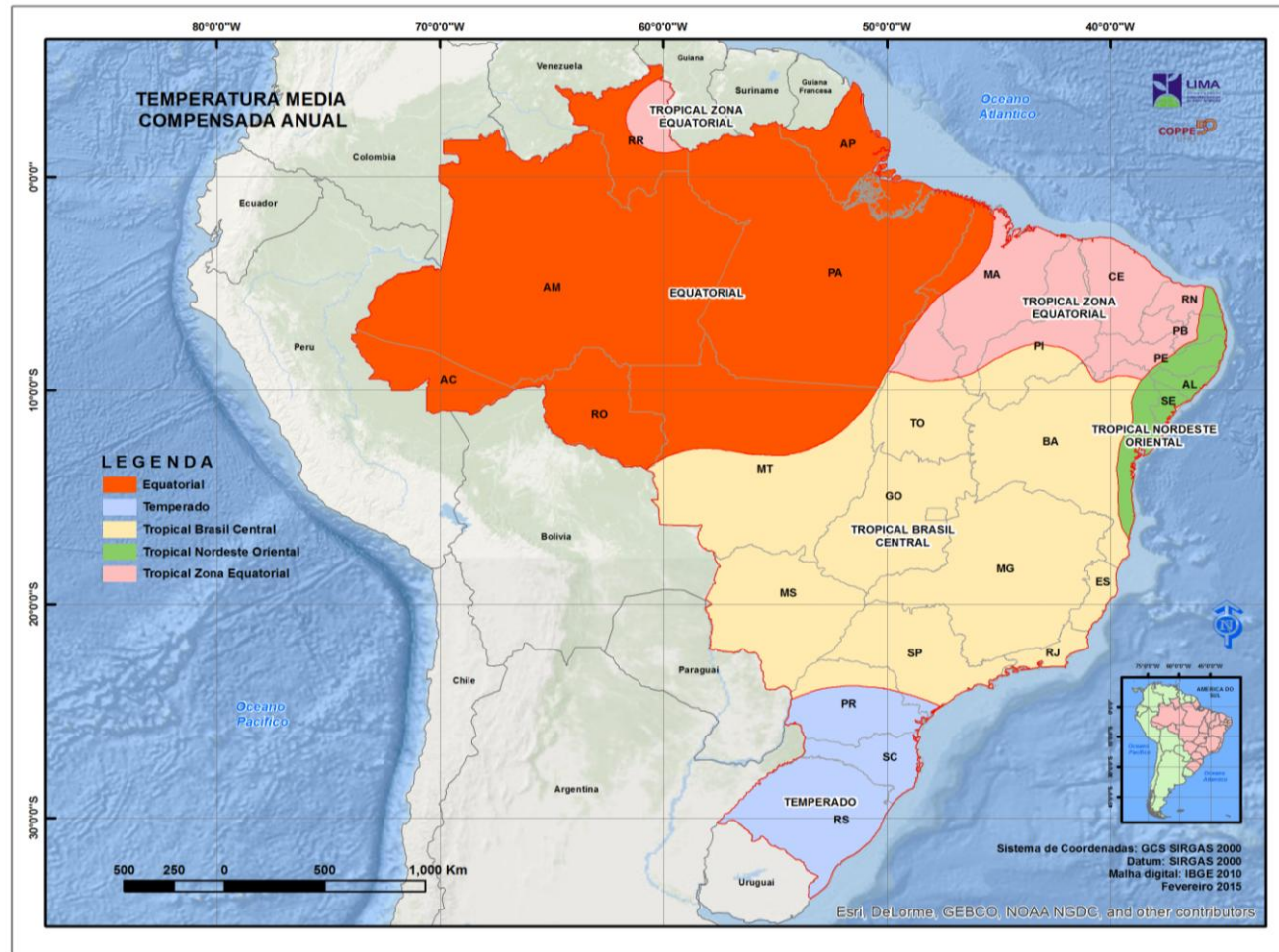
O clima do Brasil é extremamente diversificado em consequência da fisionomia geográfica, extensão territorial e relevo, assim como da dinâmica das massas de ar, que influencia diretamente a temperatura do ar e a pluviosidade (Santos, 2014). Há diversos trabalhos clássicos sobre a climatologia do país, entre os quais se destacam Nimer (1979), Mendonça & Danni-Oliveira (2007), Varejão-Silva (2006) e Torres & Machado (2008).

Segundo o IBGE (2014), o Brasil possui cinco zonas climáticas, caracterizadas por perfis de temperatura, precipitação e umidade que as distinguem entre si (Figura 6). O Quadro 8 apresenta a síntese das principais características e área de abrangência.

**Quadro 8.** Síntese das características e a área de abrangência dos climas zonais

Zona Climática	Área de abrangência	Características gerais
Equatorial	Roraima, Amapá, Amazonas, Acre, Rondônia e Pará, assim como o oeste do Maranhão e o norte do Mato Grosso	Altas temperaturas, e umidade elevada durante todo o ano caracterizam esta região, cuja temperatura média anual é de 26 °C
Tropical Zona Equatorial	Tocantins, Piauí, Ceará, Maranhão, Rio Grande do Norte, Pernambuco, região leste de Roraima e oeste da Paraíba	Apresenta inverno seco ou com pouca chuva e verão chuvoso. As temperaturas, cuja média anual é de 25°C, são elevadas e com baixa variação ao longo do ano
Temperado	Santa Catarina, Rio Grande do Sul e região central e sul do Paraná	As chuvas bem distribuídas durante o ano, ao passo que o verão apresenta temperaturas elevadas que contrastam com as baixas temperaturas do inverno. A temperatura média anual é de 19 °C
Tropical Brasil Central	Mato Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais, São Paulo, sul de Tocantins, interior da Bahia, norte do Paraná e sul do Piauí	Pode ser caracterizado pela pouca chuva no inverno, que resultam em estiagens, e verões chuvosos e quentes, sendo que o inverno apresenta frio moderado. A temperatura média anual é de 20 °C
Tropical Nordeste Oriental	Faixa litorânea entre o Rio Grande do Norte a Bahia Região	Reduzida pluviosidade no verão e inverno chuvoso. A temperatura média anual é da ordem de 25 °C

Fonte: Elaboração própria, com base em IBGE (2014)



**Figura 6.** Zonas climáticas do Brasil  
 Fonte: Elaboração própria

A densidade das redes de estações meteorológicas é ainda muito pequena para grande parte do Brasil e, em alguns casos, quase nula, em especial na Amazônia, centro-oeste e leste. Trata-se de um dos principais fatores limitantes ao estabelecimento de conclusões mais refinadas sobre a climatologia presente.

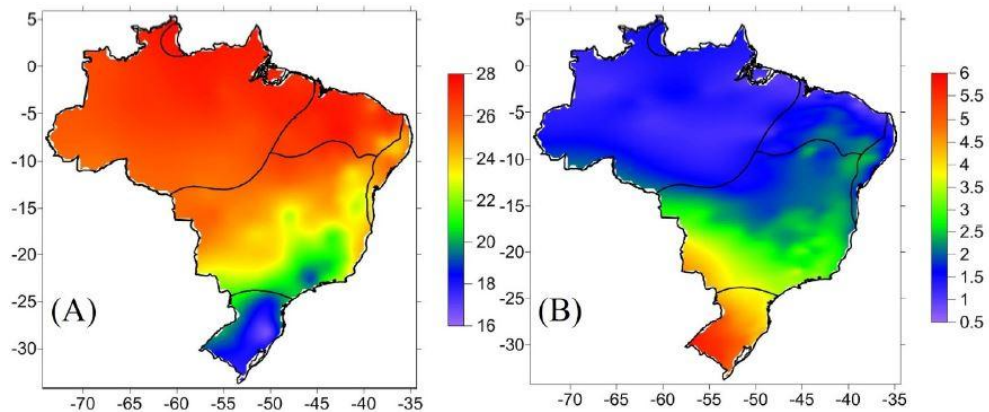
O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) fornece acesso a séries históricas de dados meteorológicos diários para diversos indicadores de clima. As normais climatológicas se baseiam em dados de 394 estações meteorológicas de superfície, compreendendo o período de primeiro de janeiro de 1961 a 31 de dezembro de 1990.

Santos (2014) utilizou as séries históricas do INMET para avaliar a autocorrelação e complexidade de séries temporais para as zonas climáticas do Brasil, sendo este trabalho um raro exemplo de avaliação da climatologia nacional, com base no recorte geográfico adotado pelo IBGE (2014). O autor compilou dados de 264 estações meteorológicas para temperatura do ar, mínima, média e máxima e umidade relativa média do ar, assim como para a velocidade média do vento. Para os quatro primeiros indicadores, faz-se, a seguir, uma síntese dos resultados alcançados.

A temperatura média diária do ar apresentou maiores valores nas regiões Norte e Nordeste, no âmbito do clima Equatorial e Tropical Zona Equatorial. Nas regiões mais quentes este parâmetro variou entre 26 e 30 °C. No outro extremo da escala, a região de clima Temperado apresentou os menores valores médios da temperatura média diária do ar.

O desvio padrão apresentou correlação com a latitude, sendo que as maiores variabilidades aparecem nas regiões com menores médias. Nas proximidades da linha do Equador, são registradas as maiores temperaturas, mas a menor variabilidade.

A média e o desvio padrão da temperatura média diária para as zonas climáticas são apresentadas na Figura 7.



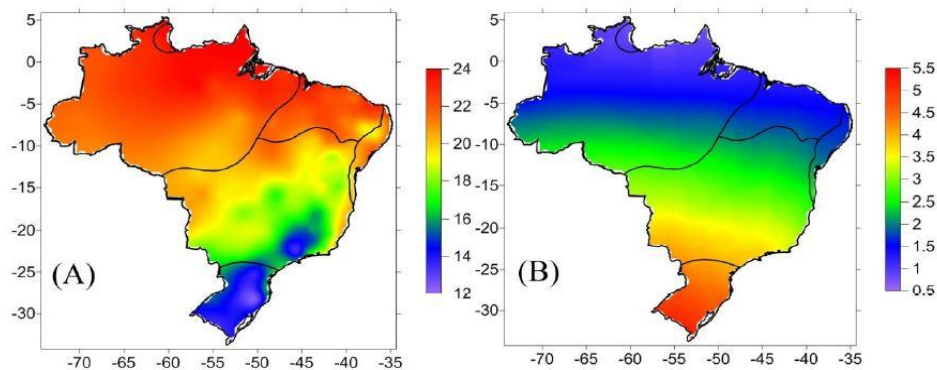
**Figura 7.** Média (A) e desvio padrão (B) da temperatura média diária do ar

Fonte: Santos (2014)

Para a temperatura mínima diária do ar, a região de clima Temperado apresenta os menores valores, à semelhança do que ocorre com a temperatura máxima. Na região central do Brasil (Tropical Brasil Central), as médias são mais amenas, comparativamente ao Norte e Nordeste, ao passo que nas regiões Equatorial, Tropical Nordeste Oriental e Tropical Zona Equatorial são observadas as maiores médias.

A variabilidade segue direção oposta às magnitudes das médias observadas. Assim, para este parâmetro o desvio padrão aumenta conforme se afasta da linha do Equador, em faixas bem definidas, caracterizando a influência da latitude na composição. Desse modo, quanto mais próximo da linha do Equador, as temperaturas tendem a ser altas e constantes.

A média e o desvio padrão da temperatura mínima diária do ar para as zonas climáticas são apresentadas na Figura 8.



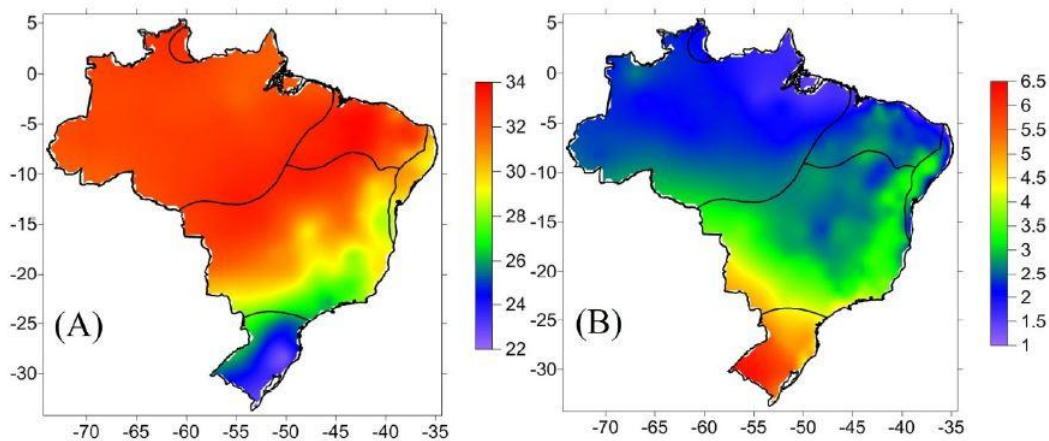
**Figura 8.** Média (A) e desvio padrão (B) da temperatura mínima diária do ar

Fonte: Santos (2014)

Santos (2014) atesta que, via de regra, o Brasil apresenta altas temperaturas do ar, sendo a média das temperaturas máximas diárias do ar, entre 32 e 35 °C, em 2/3 do País.

A região de clima Temperado apresenta as menores médias para este parâmetro climático. Assim como para a temperatura média diária do ar, as maiores variabilidades ocorrem nas regiões com menores médias, e vice versa. Em resumo, o distanciamento da linha do Equador atenua os registros da temperatura, ao mesmo tempo em que aumenta sua variabilidade.

A média e o desvio padrão da temperatura máxima diária do ar para as zonas climáticas são apresentadas na Figura 9.



**Figura 9.** Média (A) e desvio padrão (B) da temperatura máxima diária do ar

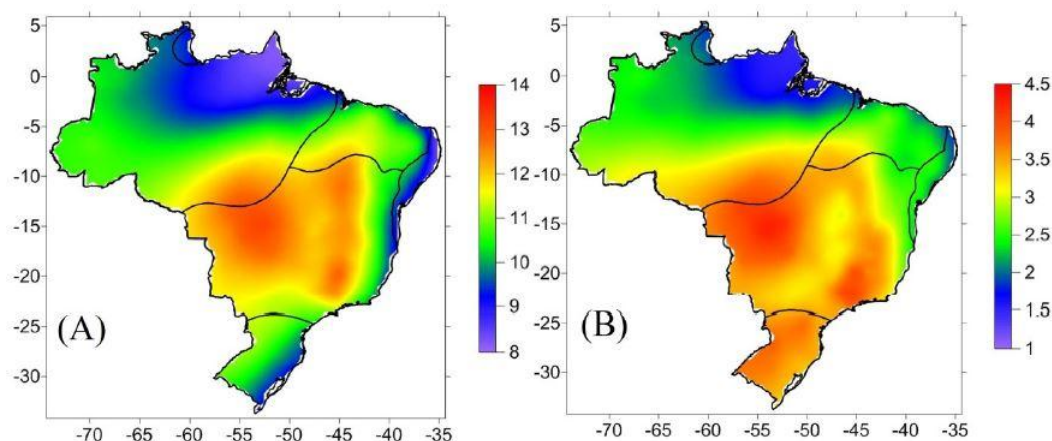
Fonte: Santos (2014)

Para a amplitude térmica, Santos (2014) atesta que o litoral do Nordeste (Tropical Nordeste Oriental) e Sul (Temperado), assim como parte da região Norte (Amapá, norte do Pará e nordeste do Amazonas (Equatorial), apresentaram as menores médias (6 a 8 °C), o que é explicado, em grande parte, pelos ventos oriundos do oceano, que atuam como moderadores da temperatura do ar.

Na região Centro-Oeste, Minas Gerais, sul do Piauí e no oeste da Bahia, na área de influência do clima Tropical Brasil Central, foram observadas as maiores médias. O comportamento do desvio padrão é similar à média, com os menores desvios localizados nas áreas de menor média, especialmente na região de clima Temperado, que apresenta desvio padrão relativamente alto, comparado aos valores médios da mesma região.



A média e o desvio padrão da amplitude térmica do ar para as zonas climáticas são apresentadas na Figura 10.

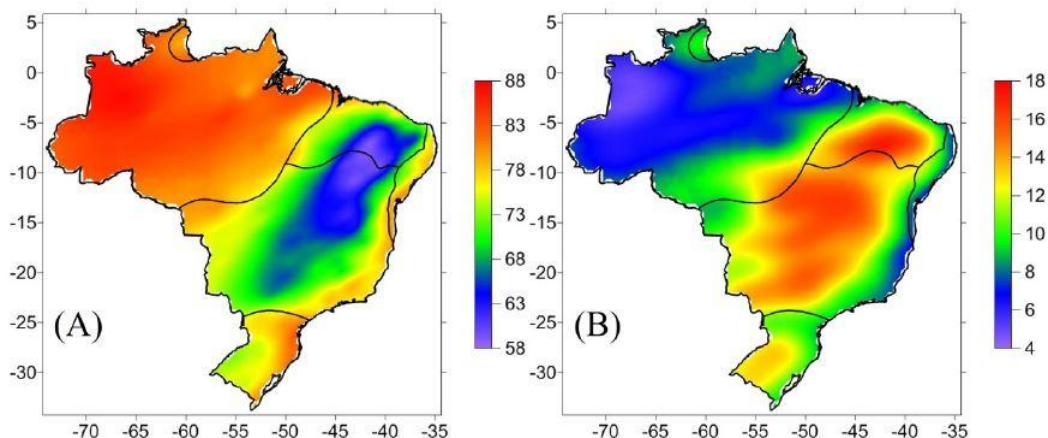


**Figura 10.** Média (A) e desvio padrão (B) da amplitude térmica do ar

Fonte: Santos (2014)

Um quinto parâmetro climático analisado por Santos (2014) diz respeito à umidade relativa diária do ar. A região de clima Equatorial registrou as maiores médias, o que se deve à combinação de grandes volumes de água, altas temperaturas, extensa e densa cobertura vegetal e baixa velocidade do vento. As menores variabilidades foram observadas em regiões próximas a grandes volumes de água (região Amazônica e no litoral), sendo que as maiores variabilidades registradas nas regiões com as menores médias de umidade relativa do ar.

A média e o desvio padrão da umidade relativa do ar para as zonas climáticas são apresentadas na Figura 11.



**Figura 11.** Média (A) e desvio padrão (B) da umidade relativa do ar

Fonte: Santos (2014)

O clima do Brasil é também frequentemente apresentado com referência à divisão geopolítica regional, muito embora seja uma representação meramente artificial, que desconsidera, largamente, toda a complexa dinâmica climatológica observada em território nacional. No Anexo I, consta uma breve descrição do clima para as cinco regiões brasileiras.

De forma complementar, são apresentados, a seguir, os mapas de temperatura média compensada anual (Figura 7) e precipitação acumulada anual (Figura 8), os quais se basearam em dados observacionais de, respectivamente, 300 e 338 estações meteorológicas do INMET. Cumpre ressaltar que falhas e interrupções nos registros dos dados históricos justificam o número final relativamente reduzido de estações aproveitadas para o estudo de cada variável meteorológica.

As coletas de dados nas estações meteorológicas convencionais do INMET são realizadas nos horários de 12, 18 e 24 UTC. Em algumas estações, entretanto, as observações são realizadas em apenas dois horários, via de regra, 12 e 24 UTC. Os valores diários utilizados nos cálculos das normais climatológicas resultam dessas observações.

Para o cálculo da temperatura média compensada, em particular, foi utilizada a seguinte fórmula:

$$TMC = \frac{T_{max} + T_{min} + T_{12} + 2T_{24}}{5}$$

Onde:

TMC = Temperatura média compensada

Tmax = Temperatura máxima do dia

TMin = Temperatura mínima do dia

T212 = Temperatura registrada em 12 UTC

T24 = Temperatura registrada em 24 UTC

A metodologia detalhada para a produção de normais climatológicas está detalhada em Ramos *et al.* (2009). Para efeito de análise dos indicadores, foi adotado o recorte de zonas climáticas do IBGE (2014).

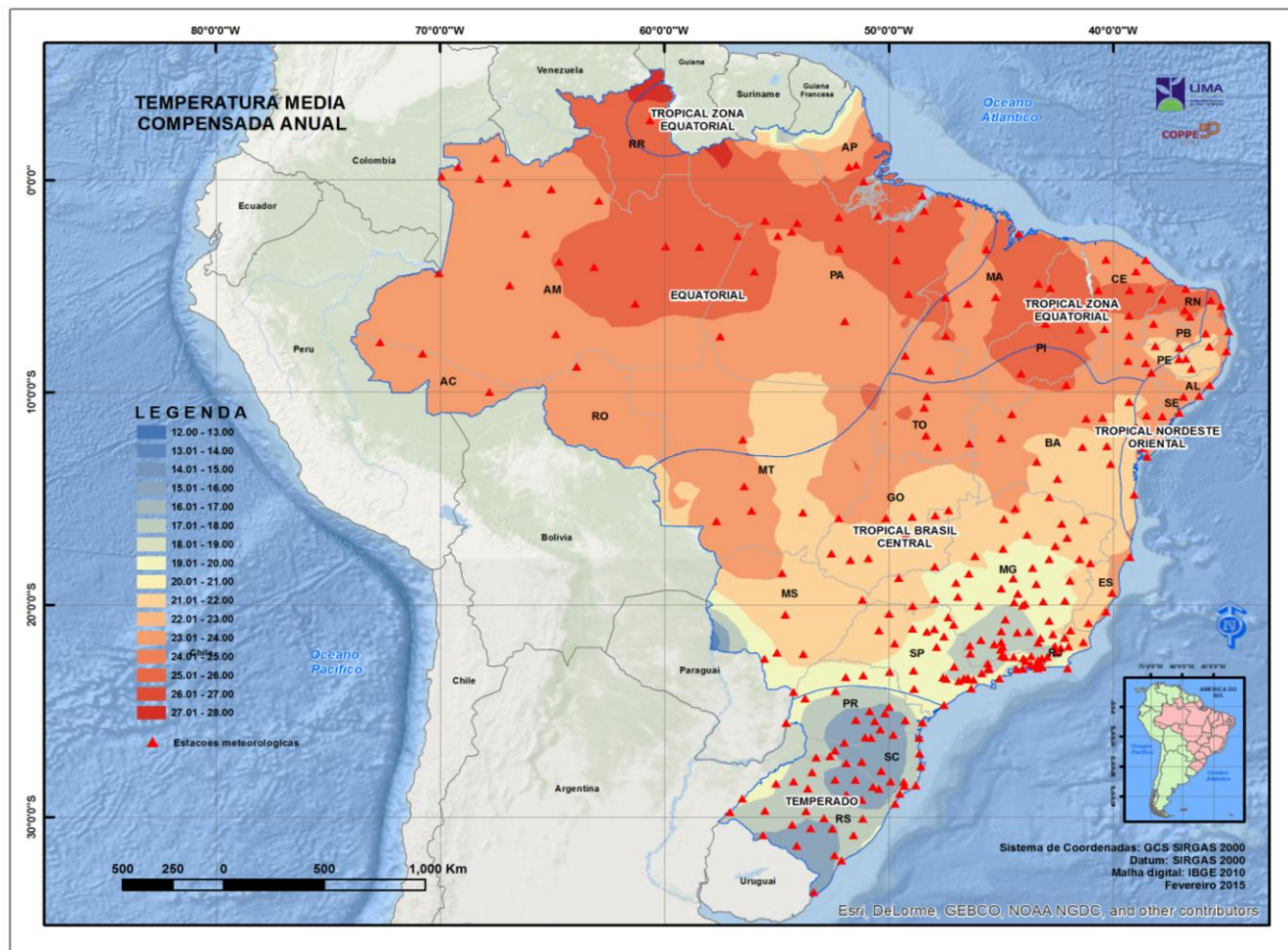
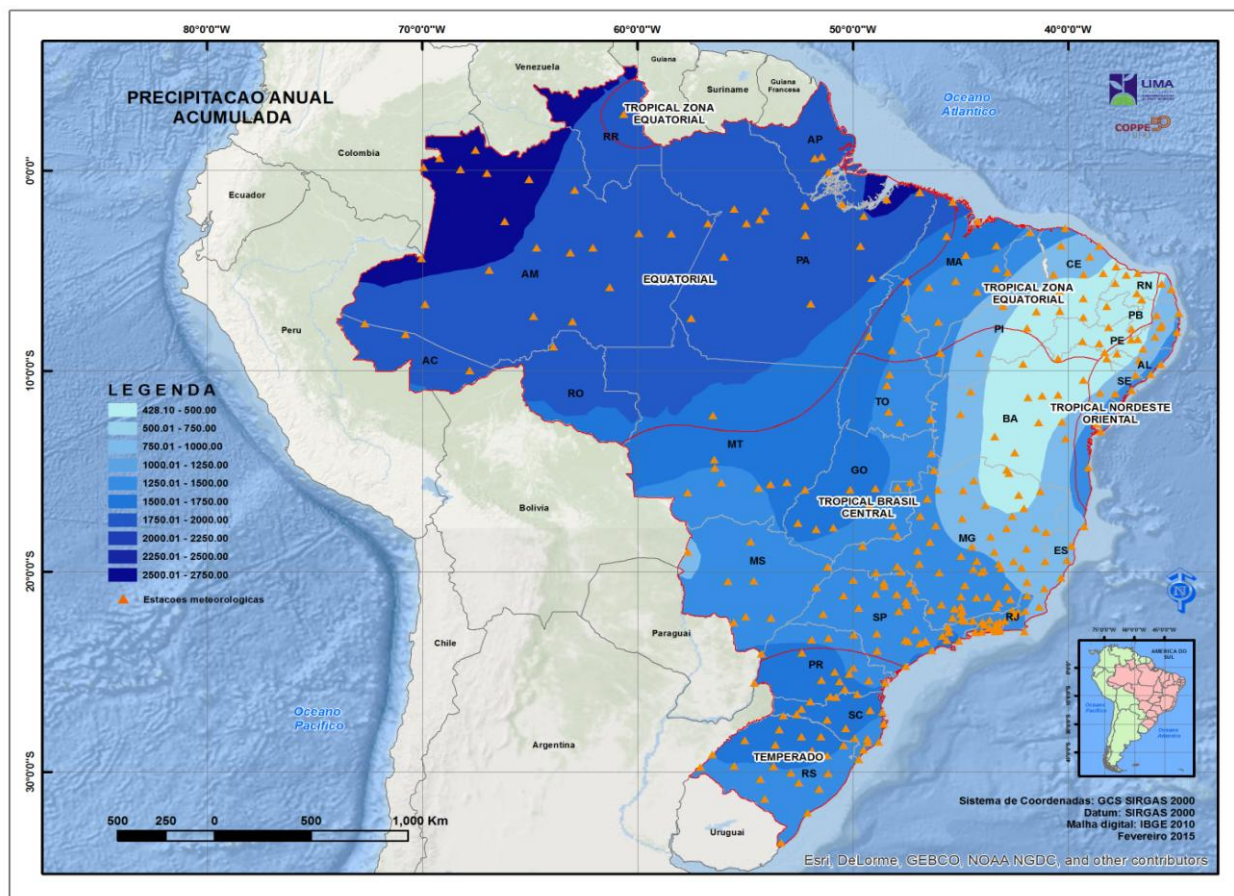


Figura 12. Temperatura média compensada anual.

Fonte: Elaboração própria



**Figura 13.** Precipitação acumulada anual

Fonte: Elaboração própria

### 3.2.2. Evidências Observacionais das Variações Climáticas

Em conformidade com uma relativamente vasta literatura, admite-se que estão em curso mudanças no clima presente em grande parte do Brasil. Na prática, mudanças nos parâmetros do clima base (anomalias) e extremos climáticos já são perceptíveis em várias partes do território nacional. Em diversos casos, vem sendo considerados atípicos no que diz respeito à intensidade, frequência, magnitude e abrangência espacial.

Conforme enfatizam Marengo *et al.* (2007), os eventos climáticos extremos de curta duração (p. ex. chuvas intensas, ondas de calor e frio, períodos secos) são considerados os mais importantes pelos climatologistas, na medida em que modelos climáticos e estudos de projeções do clima futuro, que tratam de cenários de aquecimento global, apontam na direção do aumento na frequência e intensidade dos mesmos.

Cumpra salientar, porém, que parte da variabilidade do clima detectada no Brasil, particularmente com relação à precipitação pluviométrica, pode ser explicada por mudanças de fase em oscilações decadais. No entanto, é possível afirmar, da mesma forma, que tal fenômeno seja consequência do atual aquecimento global observado (PBMC, 2012).

Reanálises realizadas, desde 1948, apontam para o aumento da temperatura média anual em baixos níveis na atmosfera durante o verão austral, com mais intensidade na direção dos trópicos da América do Sul; nos subtropicais, ao contrário, verifica-se tendência negativa desde meados da década de 1990, particularmente para alguns pontos do sudeste do Brasil (PBMC, 2012).

Recentemente, Marengo *et al.* (2014), com base em extensa atualização das tendências observadas com relação a mudanças no clima do continente, entre 1901 a 2012, diagnosticaram aumento na temperatura entre 0,5 e 3,0 °C, com incrementos mais significativos na região tropical.

Não obstante, Torres & Marengo (2013) citam diversos estudos estratégicos que atestam que a América do Sul é particularmente vulnerável a extremos climáticos na atualidade, sobretudo na porção tropical (p. ex., Baettig *et al.*, 2007; IPCC, 2007; Diffenbaugh & Giorgi, 2012), e que poderá ser afetada, em grande extensão, pelo clima futuro mais quente (Marengo *et al.*, 2010 a, b; Marengo *et al.*, 2011; Rusticucci *et al.*, 2010; Torres *et al.*, 2012; Donat *et al.*, 2013; Sillmann *et al.*, 2013 a, b).

Com relação à temperatura, Vincent *et al.* (2005) identificaram, para o período 1960-2000, para o sudeste da América do Sul, tendências positivas na frequência de noites quentes e medianamente quentes, assim como tendências negativas na frequência de noites frias e na amplitude térmica diária, bem como fraca tendência negativa de aumento de dias frios. Tais resultados sugerem que o aquecimento é maior em função do aumento das temperaturas máximas e redução na frequência de dias frios, convergindo com os resultados obtidos por Rusticucci & Barrucand (2004).

Marengo *et al.* (2010 a), também analisando séries climatológicas, para 1960-2000, destacaram o aumento significativo das noites quentes na América do Sul, reforçando constatações de Vincent *et al.* (2005) e Alexander *et al.* (2005).

Regionalmente, Manyu (2013) atestaram aumento das temperaturas mínima e máxima anuais médias no Paraná. Com relação às temperaturas mínimas, há tendência de aumento mais significativo, comparativamente às máximas. No Sul do Brasil, Marengo & Rogers (2000) verificaram que a quantidade de ondas de frio diminuiu e que as temperaturas do inverno mostram tendência de elevação.

Com relação à precipitação pluviométrica, Marengo *et al.* (2014) detectaram sinais claros de aumento gradual no sudeste na América do Sul, onde Haylock *et al.* (2006) afirmam haver, entre 1960 e 2000, tendência positiva de aumento extremos de chuva, tanto com relação à intensidade, quanto frequência. Da mesma forma, tendências positivas na chuva máxima acumulada em cinco dias têm sido observadas nas latitudes acima de 20 S no continente durante a primavera, verão e outono (Marengo *et al.*, 2007).

Para a Bacia Amazônica, Marengo (2004) e Satyamurty *et al.* (2010) não detectaram tendência unidirecional de longo prazo para condições mais secas ou úmidas, desde a década de 1920. Entretanto, Espinoza *et al.* (2009 a, b) atestaram que a precipitação média decresceu entre 1964 e 2003, alinhado à redução da convecção e nebulosidade na região, de acordo com Arias *et al.* (2012).

Haylock *et al.* (2006) sugeriram, ainda, condições mais úmidas no sul do Brasil. Tais resultados alinham-se com os obtidos por Groissman *et al.* (2005) e Alexander *et al.* (2005), para a mesma região. Alexander *et al.* (2005), adicionalmente, identificaram tendências positivas, para 1961-2000, no número de dias com chuva intensa (R10mm) e chuva muito intensa (R20mm), concentrada em curto tempo, e em indicadores de chuvas que produzem enchentes (R95P e (R99P).

A região também apresenta tendência de aumento de dias no ano com acumulado pluviométrico acima de 10 mm, onde alcança até 12 dias (Marengo *et al.*, 2010 b).

Groisman *et al.* (2005) e Teixeira (2004) são convergentes ao afirmarem que, no Sul do Brasil, há tendência de aumento no número de eventos extremos e chuva. Ainda que não haja aumento da precipitação, ou que até ocorra diminuição do total anual, dados observacionais mostram que chuvas isoladas serão mais intensas e os temporais mais frequentes. Para Marengo *et al.* (2007), as chuvas estão se tornando cada vez mais violentas, apesar de o total anual precipitado não ter sofrido modificação perceptível.

Alterações na frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação e temperatura vêm sendo constatadas ao longo dos últimos 50 anos em várias regiões do Brasil (Marengo *et al.*, 2007). Assim, dias e noites frias e geadas têm se tornado menos frequentes, enquanto que o número de dias e noites quentes, ocorrências de chuvas fortes e ondas de calor registram aumento, principalmente no centro-sul do país.

Haylock *et al.* (2006) observaram tendência de aumento do total anual de chuva sobre o Nordeste do Brasil, conclusão reforçada por Santos e Britto (2007), que atestaram elevação da precipitação total anual na Paraíba e Rio Grande de Norte, e Costa dos Santos *et al.* (2009), para o Ceará. Por seu turno, Marengo *et al.* (2007) identificaram tendências positivas de aumentos sistemáticos de chuva no Nordeste, e Groisman *et al.* (2005) de extremos de chuva, para a mesma região.

Obregón & Marengo (2007) detectaram tendências negativas na precipitação no norte e oeste de Minas Gerais, porém positivas, para o Estado de São Paulo. Para o Sudeste, Marengo *et al.* (2007) registraram aumentos sistemáticos na frequência de chuvas intensas, desde 1940, de até quase 58 %/100 anos. Para o Paraná, Manyu (2013) verificaram tendência de aumento dos períodos secos, em algumas poucas regiões, mas não identificaram alterações significativas nos indicadores de extremos de precipitação para a maior parte do Estado. De fato, as tendências são positivas para os extremos de chuva em direção ao Sul, a partir de São Paulo (Marengo *et al.*, 2007).

Estudos localizados no Brasil, em especial para cidades de médio e grande porte, também reforçam a percepção de mudanças no clima presente.



Duursma (2002), para São Paulo<sup>1</sup>, identificou tendência de aumento da temperatura. Para Resende e Nova Friburgo, no Estado do Rio de Janeiro, Marengo & Valverde (2007) identificaram aumento na temperatura mínima média anual.

Em São Paulo, totais pluviométricos diários superiores a 50 mm com frequência média de nove vezes a cada 10 anos, comuns na década de 1930, saltaram para 40 vezes, na década de 2000 (Nobre *et al.*, 2010). Em Nova Friburgo, Obregón & Marengo (2007) registraram redução significativa no índice pluviométrico, e em Pato Branco, Cambará, Ibiporã e Umuarama, no Paraná, e Manyu (2013) detectaram tendência de redução de chuvas fortes.

Valverde *et al.* (2009) analisaram 13 localidades das regiões Norte e Nordeste e constataram que, para o indicador RX1day, quase todas as estações apresentaram incremento no acumulado de chuva com evidente variabilidade interanual.

Sinais típicos de mudanças nas temperaturas extremas de Campinas e Água Funda, em São Paulo, desde 1950, foram identificados por Vincent *et al.* (2005). Nessas cidades, vem sendo detectadas tendências positivas na frequência de noites e dias quentes, e negativas, para noites e dias frios. Nesse particular, a tendência positiva da mínima temperatura estaria associada à redução do número de dias frios e aumento na frequência de noites quentes. Já a tendência positiva na máxima temperatura estaria associada à tendência de aumento na frequência de dias quentes e redução na frequência de dias frios.

### 3.2.3. Clima Futuro

A Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituída pela Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009 (Brasil, 2009), define “mudança climática” (*stricto sensu*) como:

*“direta ou indiretamente atribuída à atividade humana que altere a composição da atmosfera mundial e que se some àquela provocada pela variabilidade climática natural observada ao longo de períodos comparáveis.”*

A ampla análise da variação da temperatura, ao longo dos últimos 1.000 anos, aponta para o fato de que as mudanças atualmente observadas em nível global não poderiam resultar apenas pela

---

<sup>1</sup> Vale ressaltar que a constatação de aumento de temperatura em grandes cidades, a exemplo de São Paulo, deve ser analisada com restrições, uma vez que podem estar relacionadas não somente à variabilidade natural do clima, mas ao próprio crescimento das cidades (Marengo & Valverde, 2007).

influência de fenômenos naturais, mesmo considerando as grandes incertezas dos registros paleoclimáticos (PNMC, 2002).

Ainda que atreladas a algum grau de incerteza, há fortes evidências de que o aquecimento global observado ao longo das últimas cinco décadas se deva ao aumento na concentração de gases de efeito estufa decorrente de atividades humanas. De fato, as mudanças observadas são consistentes com a combinação de efeitos antropogênicos e forçamentos naturais. Independente dos fatores motivadores é consenso mundial de que o planeta está atravessando uma fase de rápida mudança climática, que deverá se tornar ainda mais severa nas próximas décadas (Marengo *et al.*, 2007 ou 2007).

Os relatórios de avaliação do IPCC, disponibilizados periodicamente, tornaram-se referência em nível mundial no que diz respeito às causas e impactos das mudanças climáticas globais, bem como as relativas às ações de mitigação e adaptação.

O Quinto Relatório de Avaliação (AR5), no cenário mais pessimista (RCP 8.5), aponta para a possibilidade da temperatura média da Terra se elevar entre +2,6 e +4,8 °C, e de haver um aumento médio do nível do mar entre 45 e 81 cm, ainda neste século. O aquecimento continuará além de 2100 (exceto para o RCP 2.6) e, ademais, seguirá com grande variabilidade na escala temporal (interanual e entre décadas) e com ausência de padrões regionais regulares (IPCC, 2014a).

O AR5 destaca que haverá contrastes na precipitação, entre regiões chuvosas e secas, e que também aumentarão entre estações chuvosas e secas, ainda que com exceções regionais. Em diversas regiões secas das latitudes médias e subtropicais, a precipitação média provavelmente diminuirá, enquanto que em várias regiões úmidas das latitudes médias, a precipitação média provavelmente se elevará, até 2100, no RCP 8.5 (IPCC, 2014a).

Um dos principais aspectos no que diz respeito às projeções climáticas é a potencial alteração na frequência e intensidade dos eventos extremos, a exemplo da redução do número de dias e noites frias e secas, aumento no número de ocorrências de chuvas fortes, dias e noites quentes, ondas de calor e enchentes severas (Marengo *et al.*, 2007). De fato, mudanças nos extremos do clima impactam muito mais os ambientes antrópicos e naturais, do que o aumento em valores médios (Karl *et al.*, 1997; Easterling *et al.*, 2000; Meehl *et al.*, 2000 e Frich *et al.*, 2002).

Avaliações do IPCC e de diversos estudos conduzidos independentemente, citados nos relatórios de avaliação, têm mostrado que eventos extremos de precipitação podem aumentar, ocasionando enchentes e alagamentos mais severos e intensos, num cenário de clima mais quente

(Marengo *et al.*, 2007). Nesse sentido, a intensificação de tais extremos poderia estar associada ao aumento do conteúdo de umidade da atmosfera, que retroalimentaria sistemas climáticos, como, tempestades tropicais e extratropicais e complexos convectivos de mesoescala (Trenberth, 2005).

Na América do Sul, mudanças nos padrões climáticos podem levar a alterações sem precedentes na frequência, intensidade, extensão espacial e duração do comportamento atmosférico básico e extremos climáticos (IPCC, 2014a; Magrin *et al.*, 2014).

Com base em modelos climáticos acoplados do AR4 (IPCC, 2007), diversos estudos destacaram mudanças positivas de temperatura na América do Sul, sobretudo no sudeste do continente, alguns dos quais são citados, na sequência.

Valverde & Marengo (2010) identificaram anomalias positivas de até 8 °C no centro do continente, sobretudo no inverno e na primavera, considerando o período de integração 2011-2100. Haylock *et al.* (2006) também identificaram tendência do aumento dos índices anuais para várias regiões da América do Sul, incluindo para o sudeste do Brasil, assim como Vera *et al.* (2006), com base em 16 membros de sete modelos, para 2070-2099. Estes mesmos autores identificaram, ademais, aumento de precipitação no sudeste do continente, muito embora tenham constatado redução dos índices pluviométricos sobre grande parte do continente, particularmente no inverno.

Em se tratando de “*hotspots climáticos*”, como citado no estudo de Torres & Marengo (2013):

*“...são caracterizados pelo aumento da temperatura média na superfície, sobretudo no inverno austral; pelo aumento da variabilidade interanual da temperatura, predominantemente no verão austral; e por uma mudança na variabilidade média e interanual da precipitação durante o inverno austral.”*

*Hotspots* relacionados a mudanças climáticas na América do Sul foram também identificados por Torres & Marengo (2013), que examinaram o padrão espacial do Índice Regional de Mudanças Climáticas (RCCI), para o período 2071-2100, utilizando 24 modelos globais do CMIP3 e CMIP5. Os resultados indicaram que o sudeste da Amazônia e o centro-oeste e oeste de Minas Gerais são regiões que, potencialmente, estarão sob a influência de *hotspots* identificados na modelagem climática, e que o RCCI aumenta do centro-oeste e sudeste do Brasil em direção ao noroeste da América do Sul.

Para o Brasil, é cada vez maior o número de estudos que tratam das consequências do aquecimento global, destacando-se, em particular, os trabalhos publicados por pesquisadores do INPE ou que fazem uso dos modelos regionalizados produzidos pela instituição, com resolução horizontal de até 20 km. Conforme enfatizam Alves *et al.* (2004), há diversos estudos demonstrando que modelos regionais, como o Eta, retornam boas simulações de variáveis meteorológicas em escalas sazonais e intrassazonais (e.g., Chou *et al.*, 2000; Alves *et al.*, 2000; Bustamante *et al.*, 2002), mesmo para regiões que apresentam baixa previsibilidade em simulações de Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (AGCM), como o Sul e Sudeste do Brasil (Marengo *et al.*, 2003; Cavalcanti *et al.*, 2000; Cavalcanti *et al.*, 2002).

Núñez *et al.* (2008), ao simular projeções climáticas com o modelo MM5, para 2081-2090, constataram aquecimento no sul do Brasil da ordem de 1,0 a 5,5 °C, particularmente mais intenso na primavera, e maiores mudanças na temperatura média nas regiões tropicais e subtropicais e, menores, nas latitudes abaixo de 35 °S. As mudanças nas temperaturas máximas serão maiores do que as que são projetadas para as temperaturas mínimas. Para a Região Sul, os mesmos autores constataram redução generalizada dos índices pluviométricos.

Marengo *et al.* (2011) avaliaram as projeções para as bacias hidrográficas do Rio Amazonas, São Francisco e Paraná, e constataram aquecimento entre 4,0 e 6,0 °C. Com relação à precipitação, haveria grande redução de chuva na Amazônia e no Nordeste do Brasil, em níveis que podem chegar a 40%. As alterações seriam mais intensas após 2040, caracterizando um clima mais seco e quente nas três bacias, sendo que, na do Paraná, porém, as mudanças serão menores. O leste da Amazônia e a bacia do São Francisco tendem a apresentar déficits de água e redução do escoamento fluvial.

Segundo Torres *et al.* (2009), as regiões metropolitanas do Rio de Janeiro (RMRJ) e São Paulo (RMSP) experimentarão aumento da temperatura média anual entre 2,0 e 4,0 °C, com base em saídas dos modelos regionais RegCM3 e HadRM3P, para 2071-2100. Haverá aumento no número de dias e noites quentes e redução na ocorrência de dias e noites frios. Além disso, prevê-se aumento no número de dias secos consecutivos e aumento no máximo anual de precipitação acumulada em cinco dias consecutivos. As chuvas serão mais intensas e concentradas em curtos períodos, havendo possibilidade de dobrar o número de dias com chuvas acima de 10 mm.

Silva *et al.* (2014), ao discorrer sobre projeções futuras de extremos climáticos para o Estado do Rio de Janeiro, indica que poderá ocorrer: (i) aumento das temperaturas médias anuais mínimas e máximas; (ii) aumento no número de noites e dias quentes em todo o Estado, particularmente no litoral; (iii) grande variabilidade para aumento e redução na precipitação média anual; e (iv) aumento

dos volumes totais associados a chuvas fortes (com exceção do norte e noroeste, onde se verifica a maior suscetibilidade a condições extremas do clima).

Vale observar que o Rio de Janeiro está inserido na área de transição entre as regiões de mais evidente tendência de redução e elevação da precipitação, o que resulta no aumento das incertezas associadas às projeções futuras de extremos de chuva (Marengo *et al.*, 2011).

#### **4. IDENTIFICAÇÃO DOS *HOTSPOTS* CLIMÁTICOS**

A identificação dos padrões espaciais futuros de índices de extremos climáticos associados a temperatura do ar e precipitação pluviométrica foi realizada com o objetivo de mapear áreas críticas para a infraestrutura rodoviária, aqui tratadas genericamente como “*hotspots* climáticos”.

Para efeito deste estudo, *hotspots* climáticos dizem respeito a regiões onde determinados níveis de temperatura e precipitação do clima futuro, que se manifestam em eventos climáticos específicos, ultrapassam os limiares críticos de resistência da infraestrutura rodoviária. Uma vez ultrapassado tais limiares, considerando um intervalo específico de temperatura e eventos hidrometeorológicos extremos, podem ocorrer danos à integridade física do pavimento de estradas e estruturas de drenagem, comprometendo a sua funcionalidade, em graus diversos.

*Hotspots* climáticos são, portanto, espaços particularmente suscetíveis a mudanças no clima, sendo de especial interesse para se avaliar o comportamento da infraestrutura rodoviária, atual e planejada, face aos novos padrões climáticos. Dessa forma, o conceito de *hotspot* integra sistemas físicos (clima) e antrópicos, os quais devem demandar maior atenção no que diz respeito à capacidade adaptativa.

##### **4.1. Metodologia**

Para efeito de enquadramento de eventos extremos de clima com relação aos limiares de resistência da infraestrutura rodoviária, foram adotados dois referenciais de análise, a saber: (i) intervalos de temperatura, variando de um mínimo a um máximo absoluto, e (ii) ocorrência de eventos hidrometeorológicos extremos.

O intervalo de extremos de temperatura considerou valores mensais mínimos de temperatura diária assim como valores mensais máximos de temperatura máxima. Também, foi considerado como de relevância a incorporação de um índice que expressasse o estresse do pavimento asfáltico a dias consecutivos muito quentes. Com relação à precipitação pluviométrica, chuvas acumuladas em intervalos de 24 horas e em cinco dias consecutivos pautaram a análise.

As variáveis climáticas utilizadas foram precipitação pluviométrica (PREC – Acumulado diário, em mm) e temperatura

do ar a 2 m da superfície (TP2M – Média diária, em graus Celsius), utilizadas como referência para o desenvolvimento dos modelos climáticos regionais Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)<sup>2</sup>.

As variáveis foram tratadas de forma a permitir a identificação de padrões espaciais do comportamento básico da atmosfera e de índices de extremos climáticos, para o clima futuro. O comportamento básico da atmosfera foi determinado com base no estudo de anomalias, que dizem respeito à diferença da média do clima futuro, para um intervalo de 30 anos, com relação ao clima presente (*baseline*), igualmente definido para um período de 30 anos. Os extremos climáticos também foram tratados do ponto de vista de anomalias climáticas, da mesma forma como para o comportamento básico da atmosfera, mas, adicionalmente, caracterizados com relação ao clima futuro, em termos absolutos, considerando a média do índice para um período de 30 anos.

Os índices de extremos climáticos eleitos (Quadro 9) 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 (TNn e Temp7dias) e de precipitação pluviométrica (RX1day). Foram disponibilizados pelo

#### Modelos climáticos Eta - CPTEC/INPE

Os modelos Eta do CPTEC/INPE foram adaptados para realizar integrações climáticas presentes e futuras (Chou *et al.*, 2014 a e 2014 b), tendo sido aninhados, respectivamente, no modelo global HadGEM2-ES, do *Hadley Centre Global Environmental Model*, do *Met Office Hadley Centre*, e no MIROC5, do *Center for Climate Systems Research (CCSR)*, da Universidade de Tokyo (Japão) (Collins *et al.*, 2011 ou 2013).

O *grid* regular de pontos com informação para temperatura e precipitação possui 20 km de resolução horizontal e cobre a quase totalidade da América do Sul e América Central, assim como parte dos oceanos adjacentes (Chou *et al.*, 2014b). O modelo possui 38 camadas na vertical, sendo que o topo alcança 25 hPa.

---

<sup>2</sup> Modelos regionais aninhados a modelos globais de circulação geral da atmosfera estão sendo elaborados em diversos países, na tentativa de reproduzir os mais diversos processos de retroalimentação que ocorrem em nível local. Tais processos contribuem para definir o clima, como o oceano-terra, a hidrologia, solo-vegetação, topografia etc., os quais não são apreendidos adequadamente pelos modelos globais, de baixa resolução espacial (Sen *et al.*, 2004 *apud* Machado & Rocha, 2011).

CPTEC/INPE, utilizando a metodologia de Zhang e Yang (2004) e Haylock *et al.* (2006), pelo uso do software RCLindex, do *Canadian Meteorological Service*.

**Quadro 9.** Índices de extremos climáticos

Índice	Definição	Unidade
TNn	Temperatura mínima anual	°C
Temp7dias	Média dos 7 dias consecutivos mais quentes do ano	°C
RX1day	Máxima precipitação anual em 1 dia	mm

Fonte: Elaboração própria

No presente estudo, foi adotado o período de integração futuro 2011-2040, sendo que as anomalias climáticas foram calculadas com base na diferença entre este e o período de integração atual (*baseline*), referente a 1961-1990.

Para analisar o comportamento espacial das variáveis climáticas, fez-se uso da ferramenta *Geostatistical Analyst*, do software ArcGIS Desktop (versão 10.2.2).

Em uma primeira etapa, foi investigado o comportamento espacial das variáveis, pela inspeção de histogramas e estudo de análise de tendência espacial, para a determinação da existência ou não de anisotropia e descontinuidade espacial.

Na segunda etapa, procedeu-se a interpolação dos *grids* regulares dos modelos climáticos com base no método krigagem ordinária,

para estimar valores das variáveis climáticas para locais não amostrados, a partir de dados medidos na mesma região.

#### Modelos climáticos e cenários de emissão

As famílias de cenários climáticos dos modelos do CPTEC/INPE correspondem aos Caminhos Representativos de Concentrações (CP), adotados a partir do AR5 do IPCC (IPCC, 2014a). No presente estudo, foram utilizados o RCP 4.5 e RCP 8.5, que são equivalentes, respectivamente, ao cenário B1 e A2, do AR4 (Chou *et al.*, 2014b).

O RCP 8.5 aponta para um forçamento radiativo, em 2100, maior do que 8,5 W/m<sup>2</sup> e concentração média de 1.685 ppm (variação de 1415-1910 ppm) de GtCO<sub>2</sub> equivalente, sendo que as emissões de CO<sub>2</sub> e a forçante radiativa permanecerão em ascensão. A forçante radioativa cresce quase que linearmente durante o século XXI. Por seu turno, o RCP 4.5 apresentará, ao redor de 2100, forçamento radiativo em torno de 4,5 W/m<sup>2</sup> e concentração média de emissões cumulativas de GtCO<sub>2</sub> em torno de 780 ppm (variação de 595-1005 ppm). A forçante radioativa cresce quase que linearmente até 2060, reduz a taxa de crescimento a partir de então e estabiliza, após 2100. Em ambos os cenários, admite-se que o aquecimento global deverá continuar a aumentar após 2100 (IPCC, 2014a).

Os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5, atualmente os únicos disponibilizados pelo CPTEC/INPE, apontam para anomalias da temperatura do ar a superfície da ordem de 1,8 ± 0,5 °C (ΔT = 1.1 – 2,6) e 3,7 ± 0,7 °C (ΔT = 2.6 – 4,8), para o período 2081-2100, com relação ao *baseline* 1986-2005 (Collins & Knutt, 2013).

Em uma terceira etapa, foi realizada a análise semivariográfica, para determinar a estrutura de dependência espacial das variáveis. Sequencialmente, foi definido o semivariograma teórico de melhor ajuste ao experimental, inicialmente proposto. Este procedimento foi realizado separadamente, para cada uma das variáveis e cenários climáticos e respectivos RCP.

Por fim, foi realizada a validação cruzada, tendo em vista avaliar o grau de incerteza associado aos parâmetros analisados e, dessa forma, da qualidade da krigagem. Por essa técnica, foi identificado o modelo teórico de semivariograma que melhor descreveu o comportamento espacial das propriedades das variáveis climáticas, com base na análise do erro médio padronizado (*Mean Standardized*), erro quadrático médio (*Root-Mean-Square*), erro padrão médio (*Average Standard Error*) e erro quadrático médio padronizado (*Root-Mean-Square Standardized*).

Após a interpolação das variáveis climáticas de temperatura e precipitação, foram calculadas, para todo o território nacional, as anomalias climáticas e valores absolutos dos índices de extremos climáticos, para o período 2011-2040.

## 4.2. Resultados

### 4.2.1. Anomalias climáticas

O Quadro 10 apresenta a síntese dos resultados obtidos para as anomalias climáticas do comportamento básico da atmosfera relacionadas à temperatura e precipitação, para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5 para o período 2011-2040.

As Figuras 14 a 21 apresentam a espacialização das anomalias, com relação às zonas climáticas do Brasil.



**Quadro 10.** Anomalias de temperatura (em °C) e precipitação (mm), para os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5, dos modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, por zona climática

Zona Climática	Eta/HadGEM2-ES RCP 4.5						Eta/HadGEM2-ES RCP 8.5					
	Temperatura			Precipitação			Temperatura			Precipitação		
	Min.	Max.	Média	Min.	Max.	Média	Min.	Max.	Média	Min.	Max.	Média
Equatorial	0,96	2,41	1,57	-800,61	176,96	-243,38	1,35	3,36	2,25	-1041,32	253,01	-208,35
Temperado	0,99	2,76	1,91	-682,70	101,80	-106,54	1,03	3,51	2,40	-691,42	102,62	-115,03
Tropical Brasil Central	0,81	3,00	2,02	-791,64	-19,00	-311,45	1,16	3,73	2,84	-814,53	-38,51	-287,85
Tropical Nordeste Oriental	0,88	1,15	0,99	-421,39	50,06	-88,74	1,27	1,72	1,46	-493,34	87,60	-88,01
Tropical Zona Equatorial	0,87	1,75	1,20	-398,61	111,21	-122,57	1,28	2,72	1,90	-770,91	28,20	-177,23

Zona Climática	Eta/MIROC5 RCP 4.5						Eta/MIROC5 RCP 8.5					
	Temperatura			Precipitação			Temperatura			Precipitação		
	Min.	Max.	Média	Min.	Max.	Média	Min.	Max.	Média	Min.	Max.	Média
Equatorial	0,87	1,75	1,33	-651,95	13,79	-320,47	0,91	1,93	1,38	-702,56	-22,12	-380,96
Temperado	0,26	1,01	0,62	-163,16	218,99	138,40	0,35	1,22	0,79	-202,08	272,16	151,88
Tropical Brasil Central	0,79	1,87	1,28	-665,25	105,92	-204,35	0,74	2,13	1,45	-864,48	97,72	-307,22
Tropical Nordeste Oriental	0,76	1,04	0,87	-360,73	288,92	-4,19	0,66	1,02	0,82	-460,41	190,18	-77,98
Tropical Zona Equatorial	0,74	1,49	1,02	-425,10	184,56	-126,54	0,73	1,56	1,03	-519,07	220,20	-184,99

Fonte: Elaboração própria

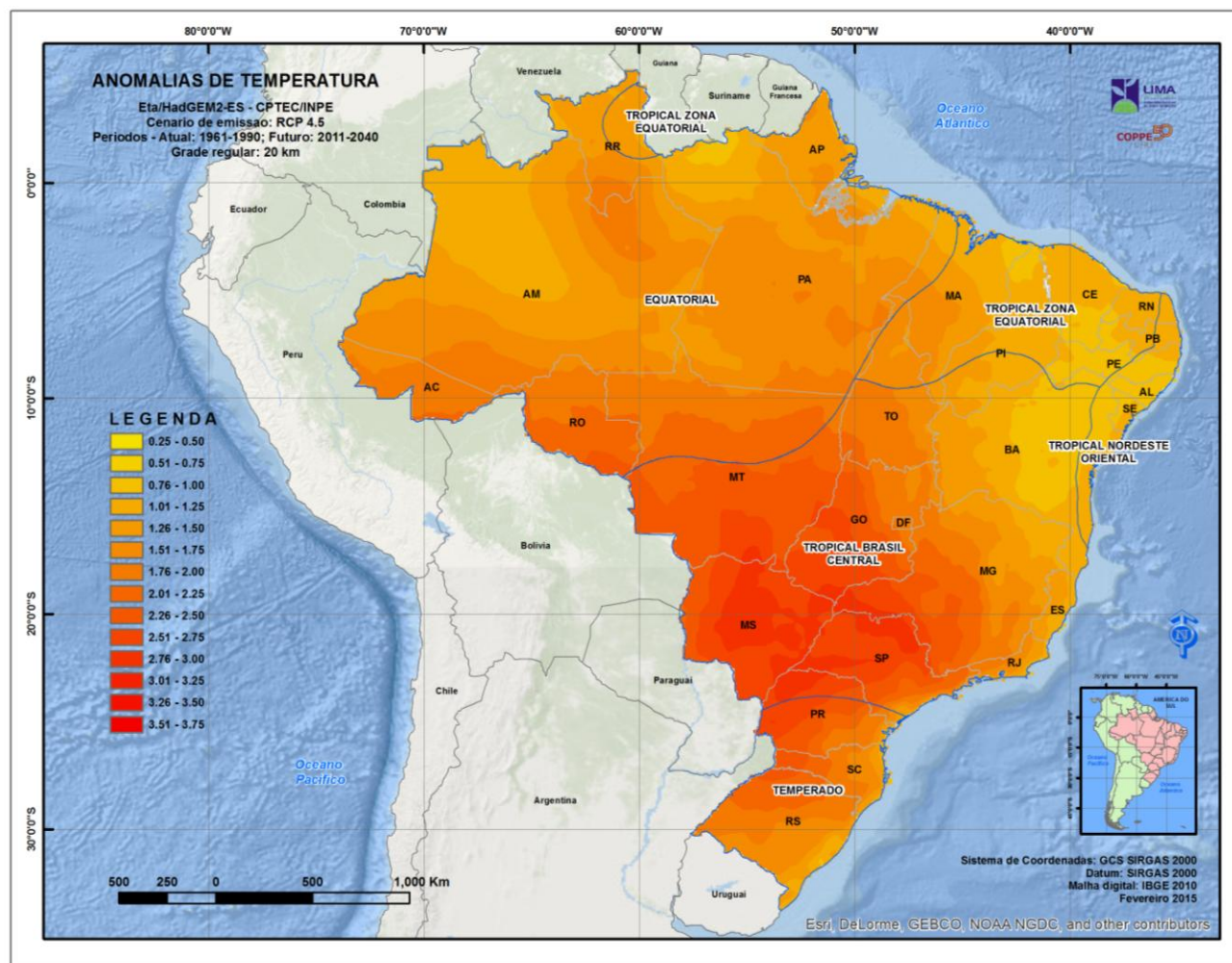
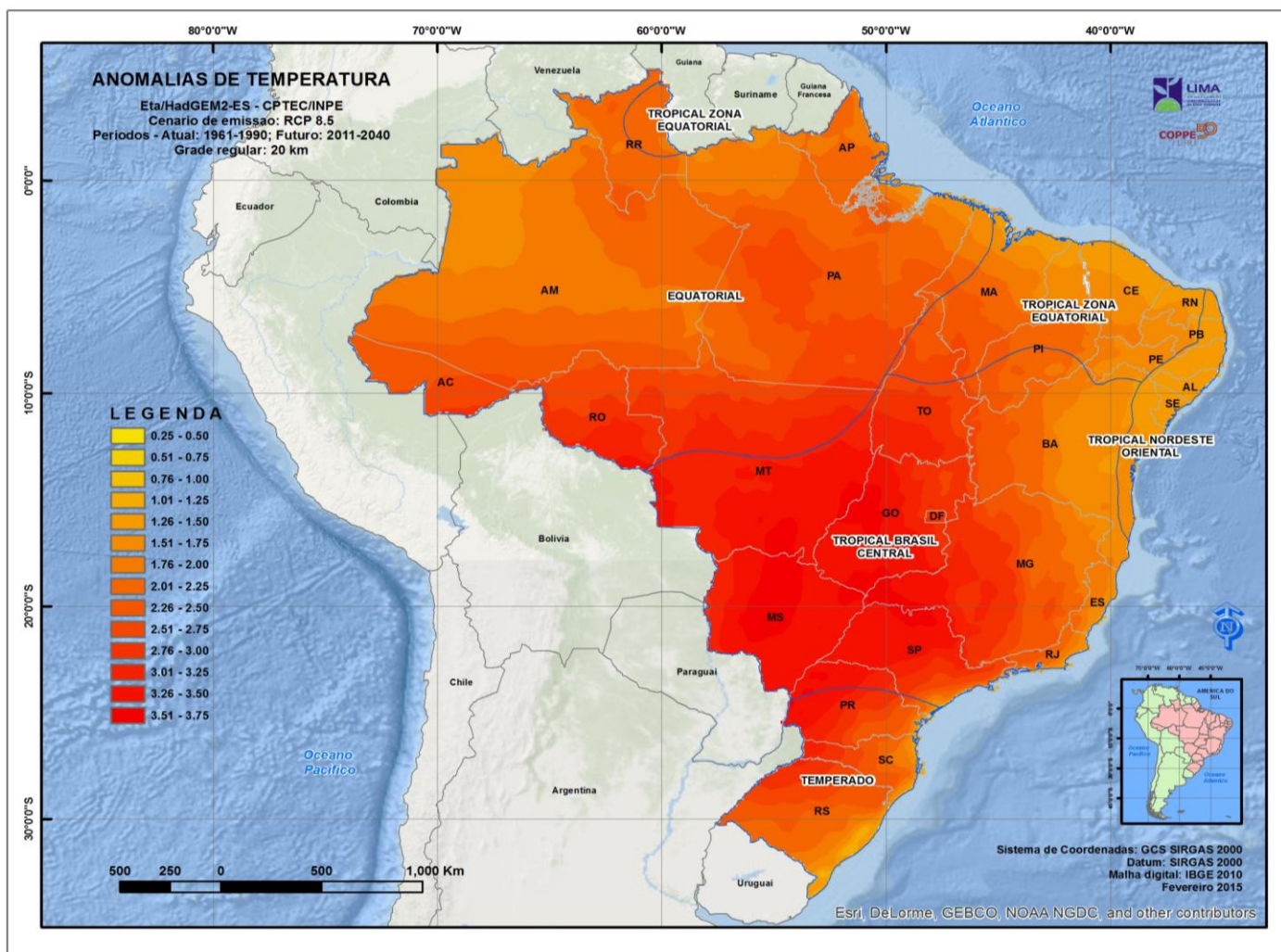


Figura 14. Anomalias de temperatura (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5

Fonte: Elaboração própria



**Figura 15.** Anomalias de temperatura (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5

Fonte: Elaboração própria

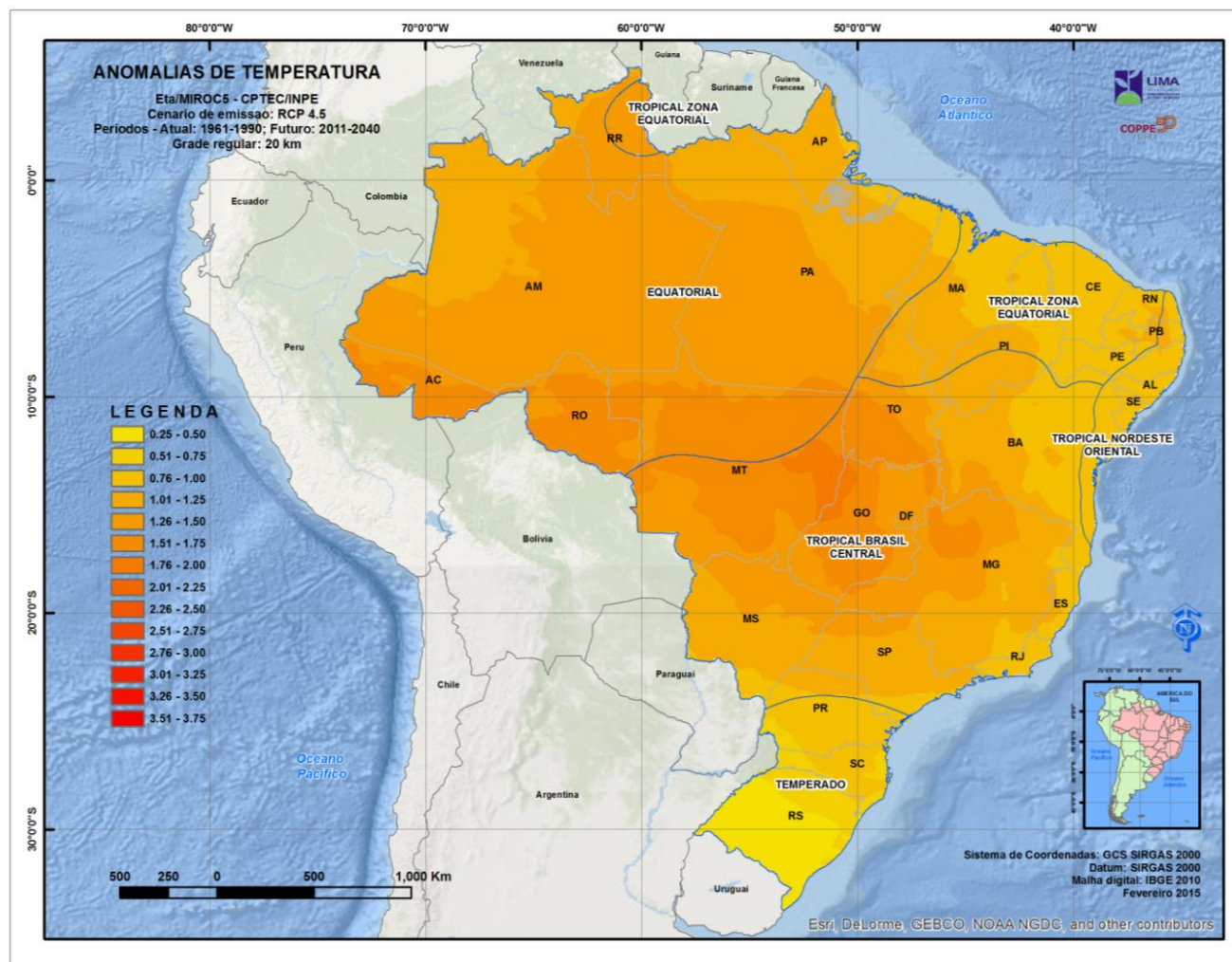
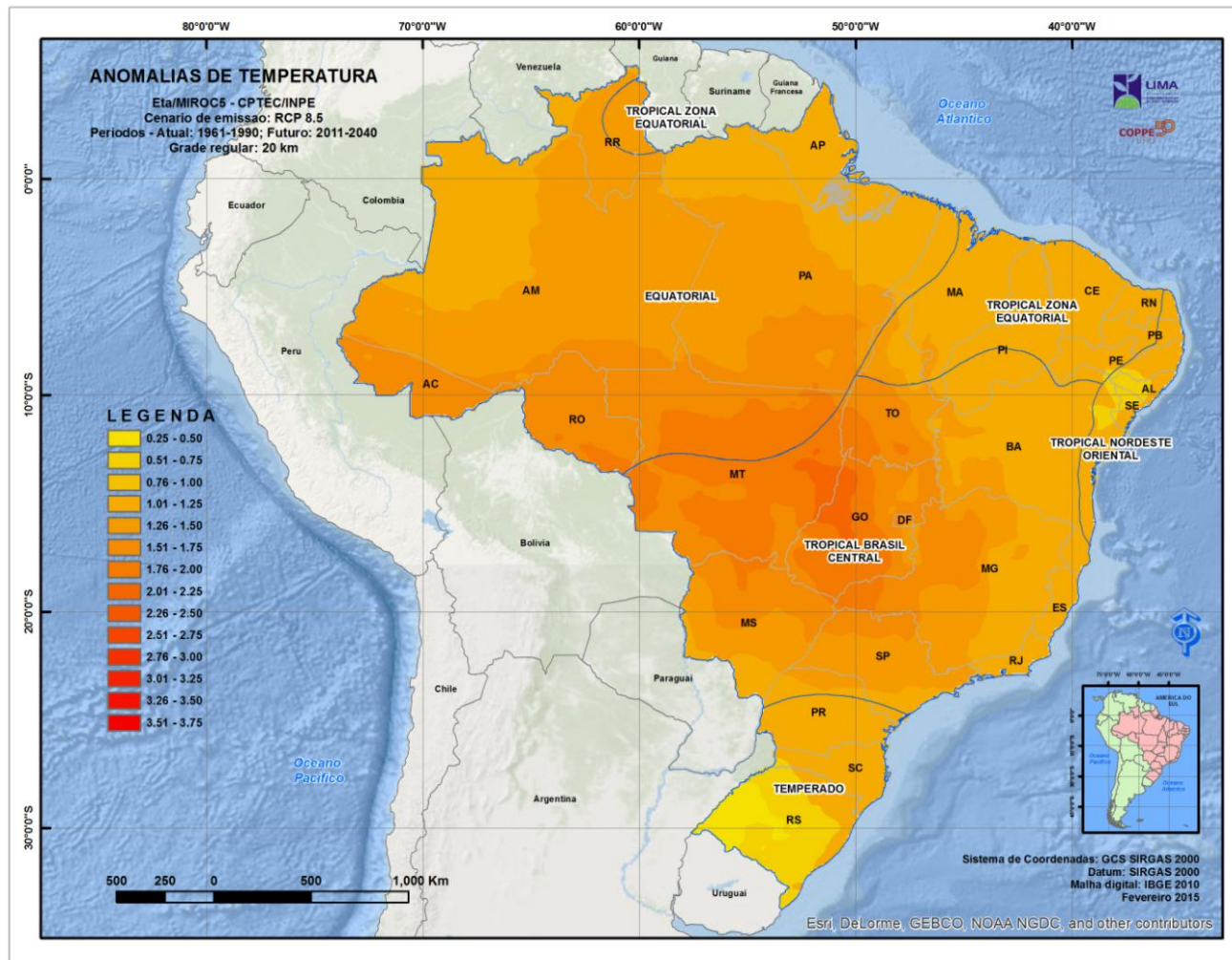


Figura 16. Anomalias de temperatura (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 4.5

Fonte: Elaboração própria



**Figura 17.** Anomalias de temperatura (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 8.5

Fonte: Elaboração própria

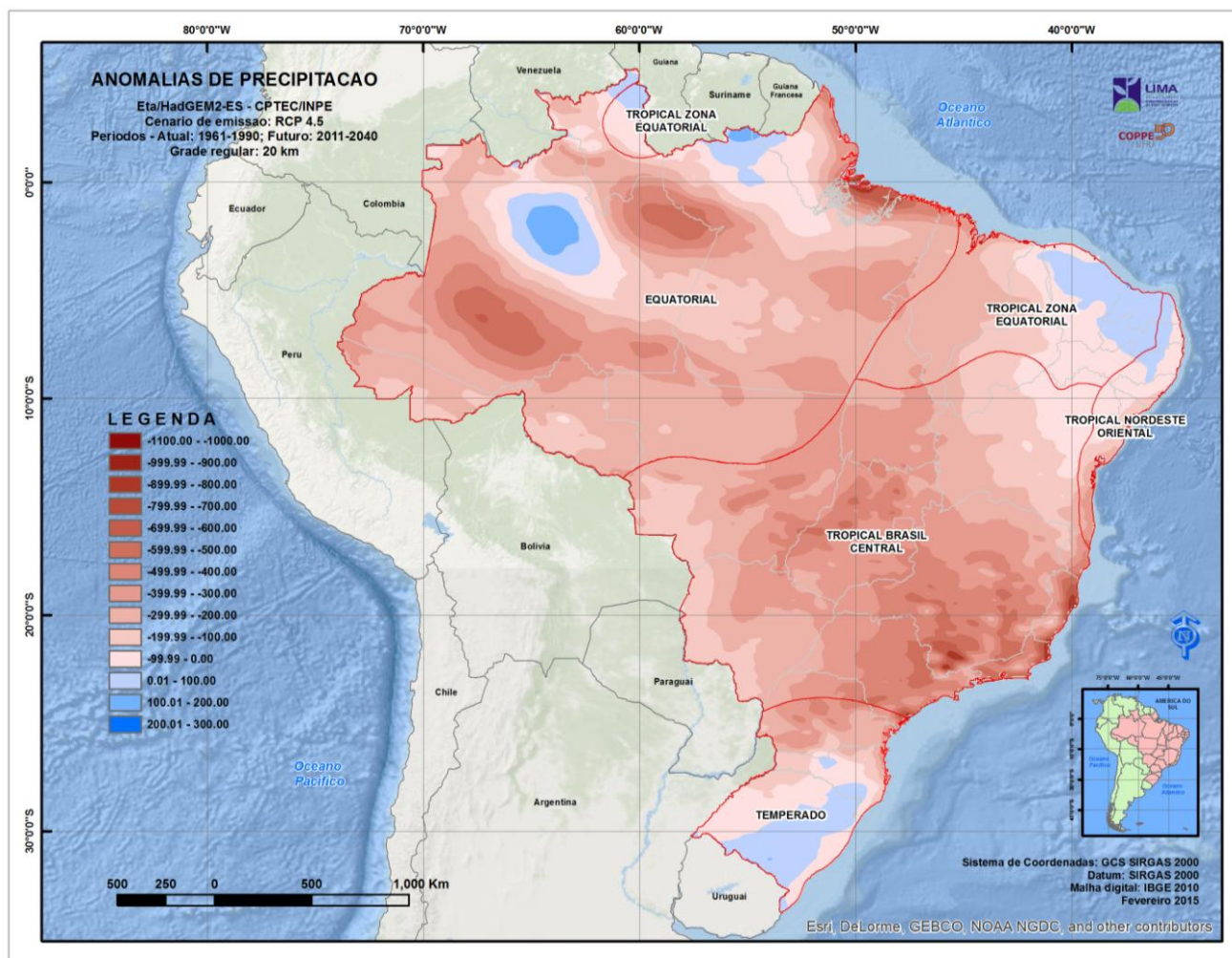


Figura 18. Anomalias de precipitação (em mm) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5

Fonte: Elaboração própria

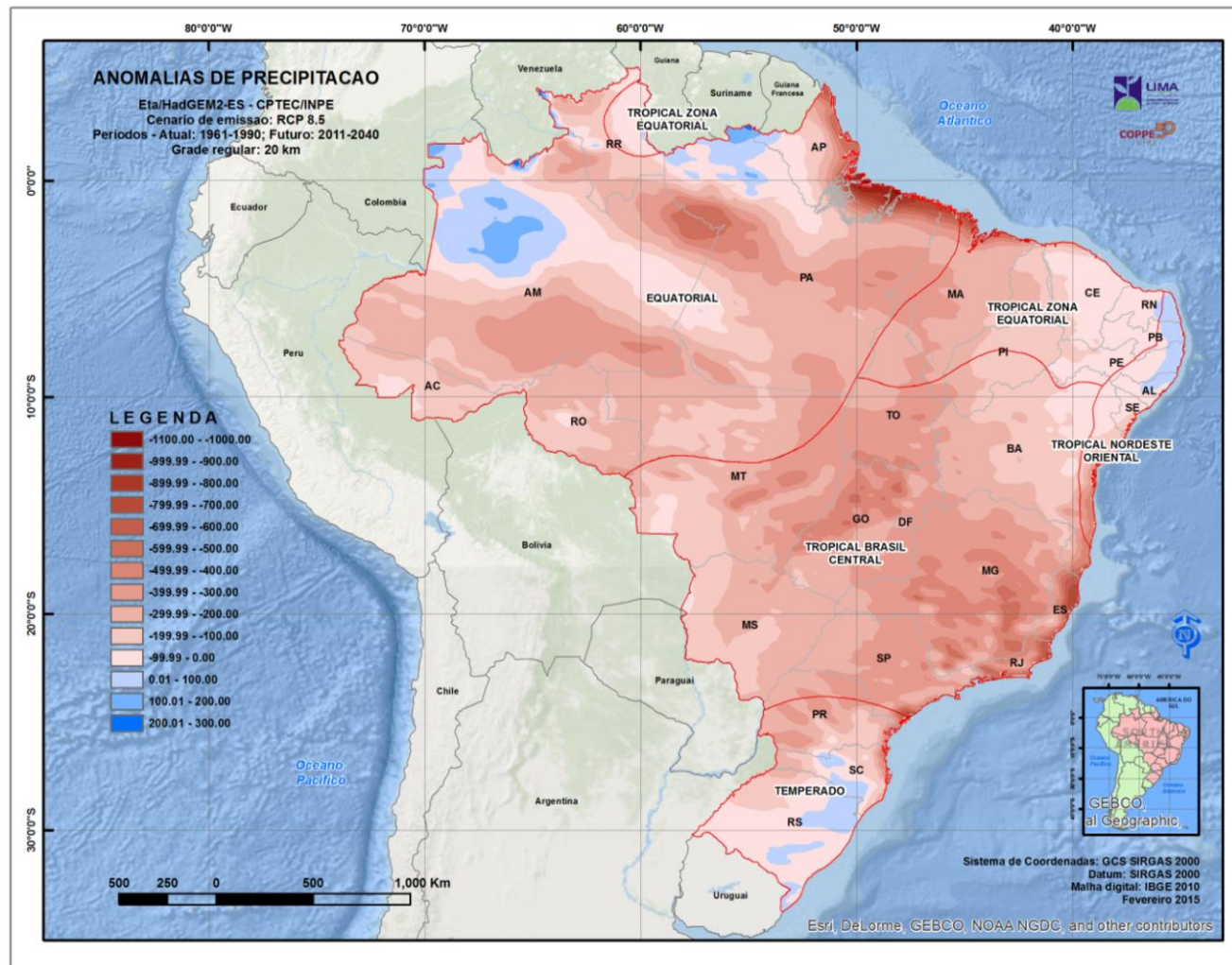
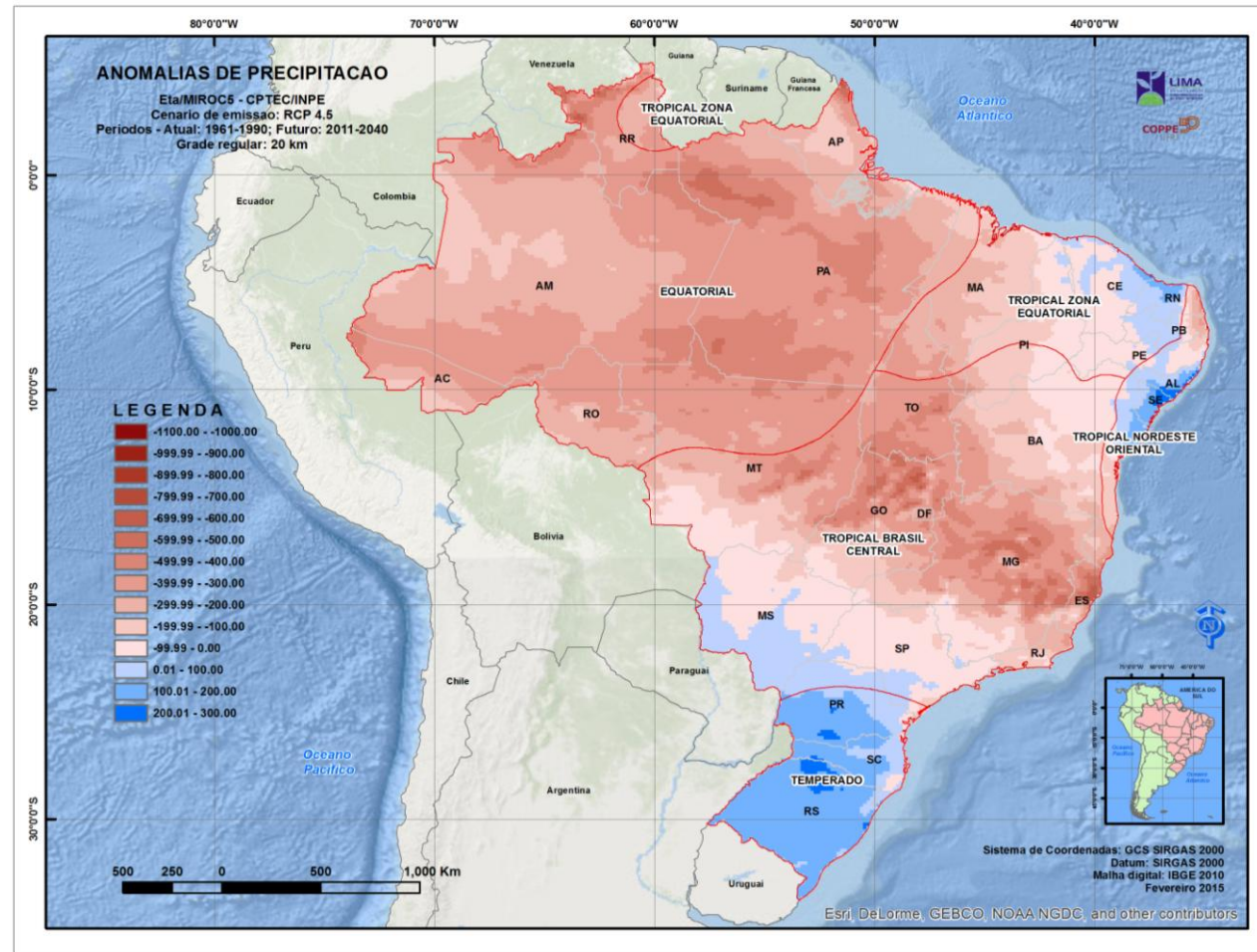


Figura 19. Anomalias de precipitação (em mm) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5

Fonte: Elaboração própria



**Figura 20.** Anomalias de precipitação (em mm) – Eta/MIROC5, RCP 4.5

Fonte: Elaboração própria



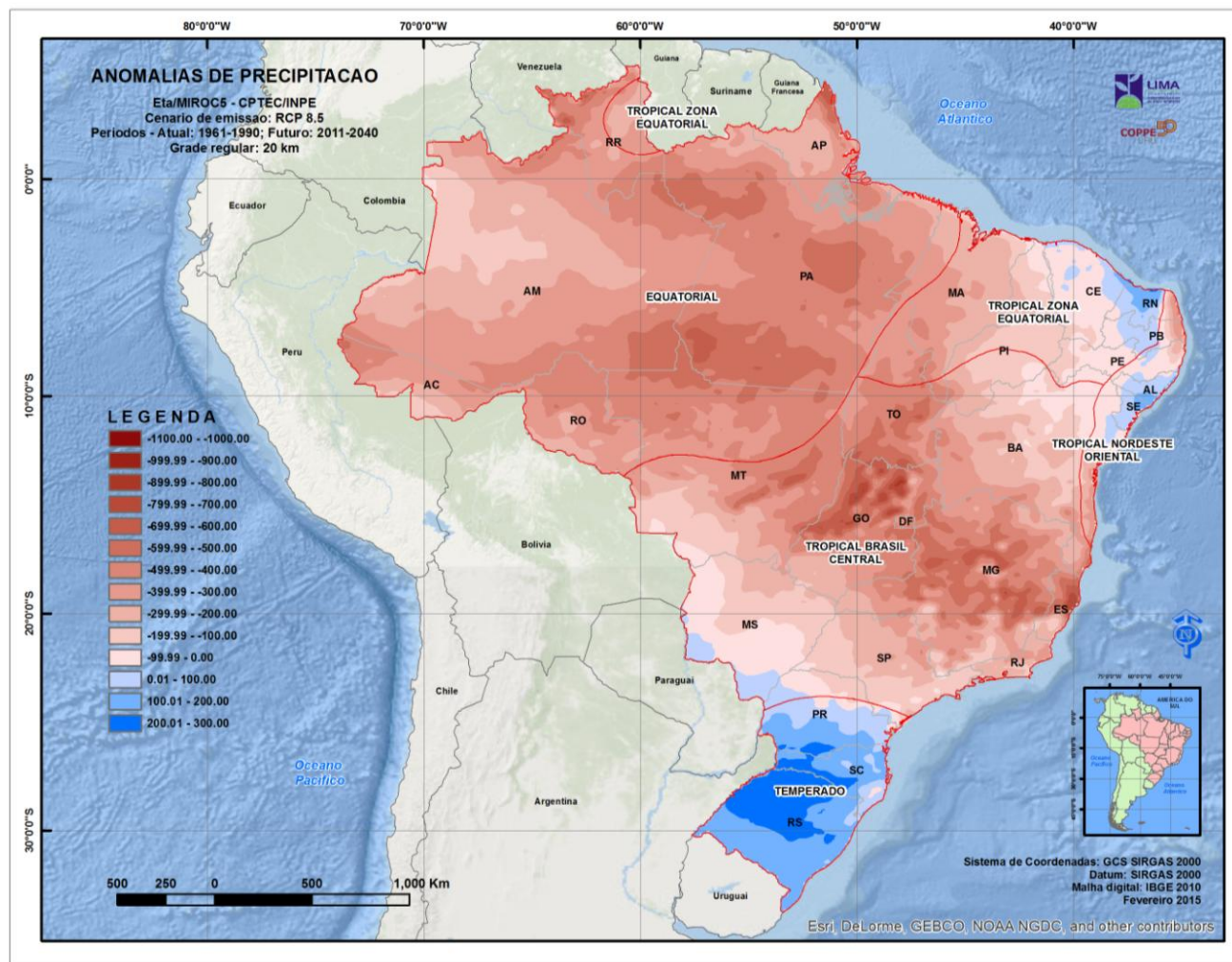


Figura 21. Anomalias de precipitação (em mm) – Eta/MIROC5, RCP 8.5

Fonte: Elaboração própria

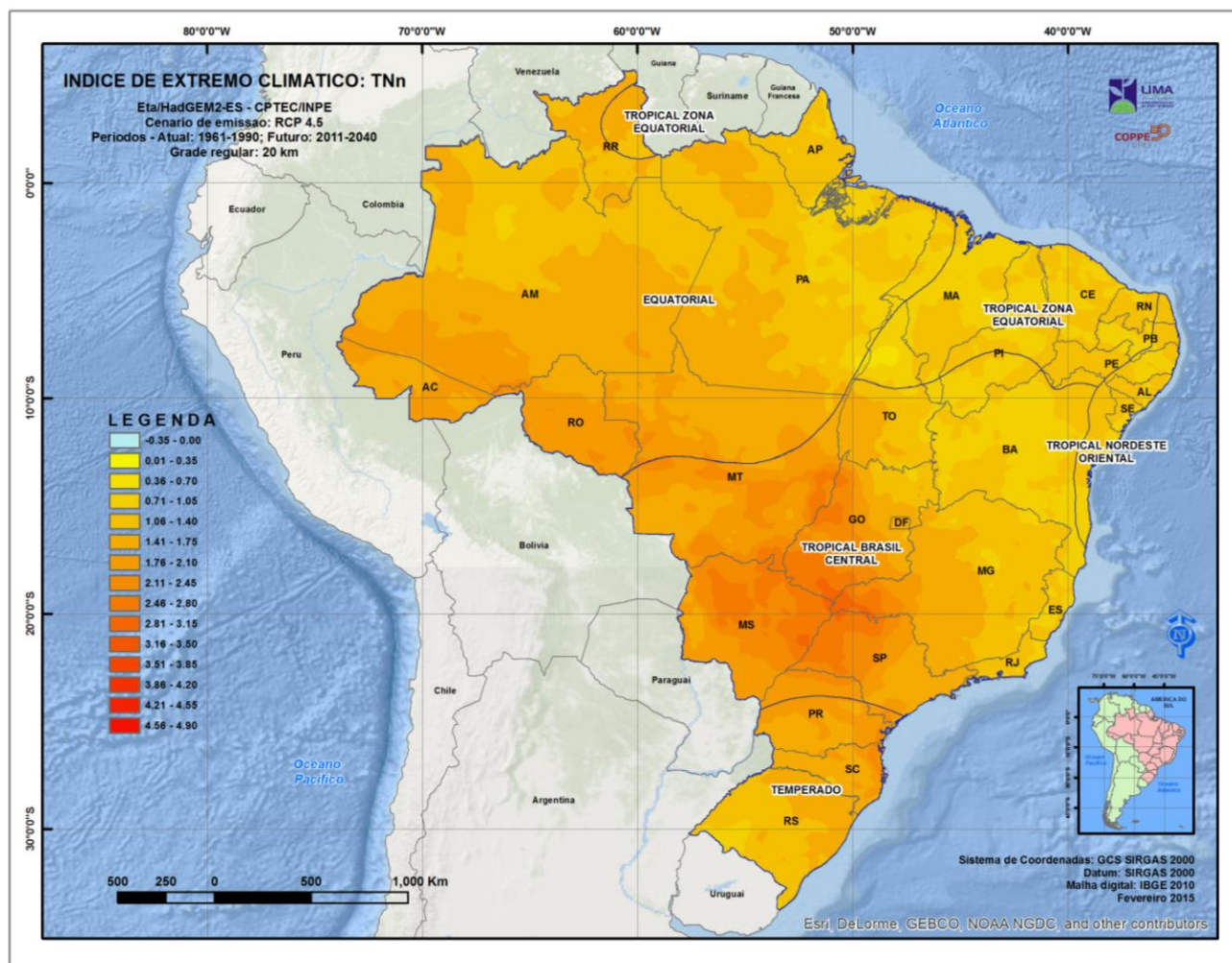
#### **4.2.2. Anomalias dos índices de extremos climáticos**

O Quadro 11 apresenta a síntese resultados obtidos para as anomalias dos extremos climáticos, para os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5, dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, para o período 2011-2014.

Adicionalmente, as Figuras 22 a 33 apresentam a espacialização dos resultados de anomalias, considerando as zonas climáticas do Brasil.

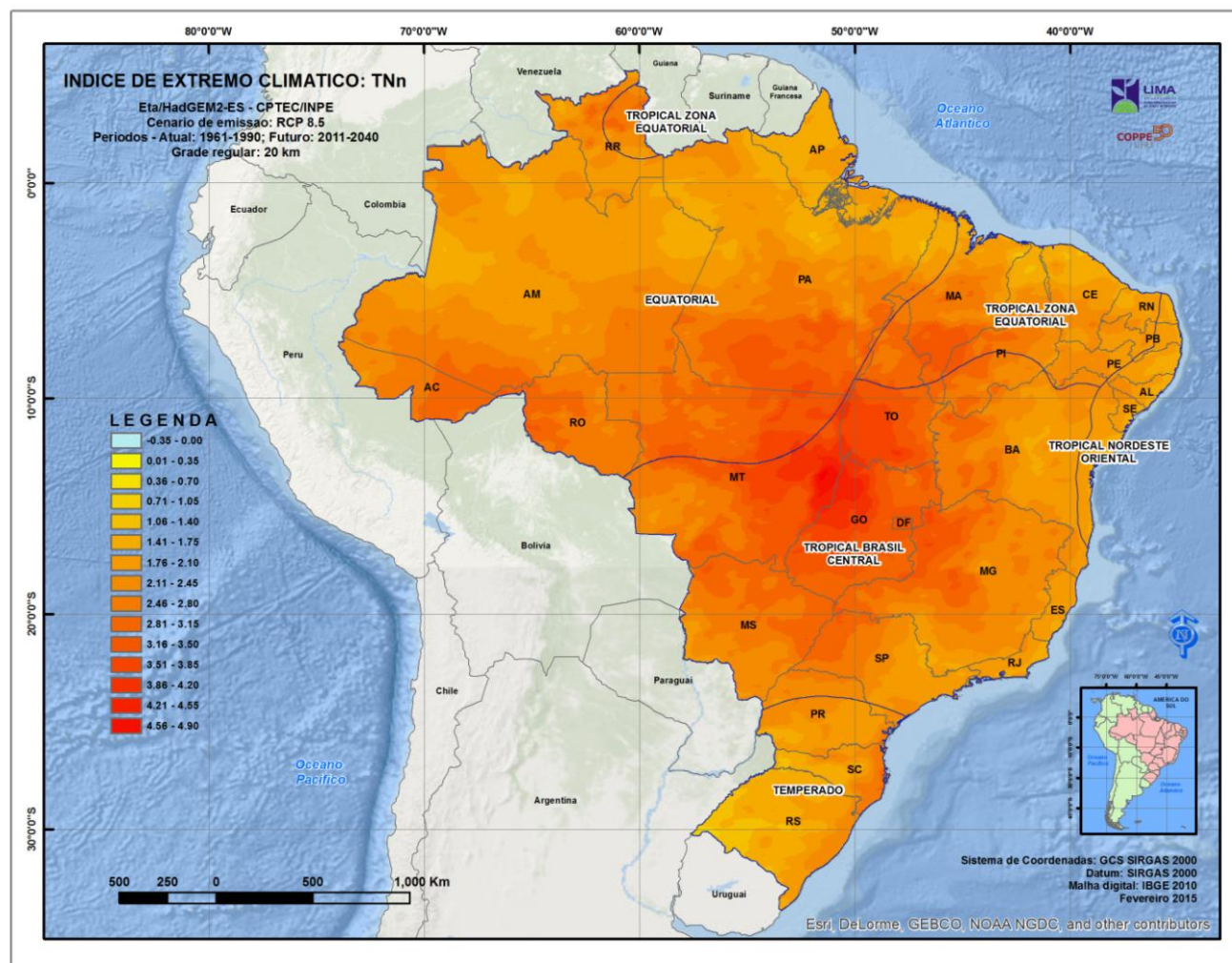
**Quadro 11.** Anomalias de extremos climáticos para os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5, modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, por zona climática

Zona climática	Eta/HadGEM2-ES RCP 4.5			Eta/HadGEM2-ES RCP 8.5			Eta/MIROC5 RCP 4.5			Eta/MIROC5 RCP 8.5			
	Min.	Max.	Média	Min.	Max.	Média	Min.	Max.	Média	Min.	Max.	Média	
<b>TNn</b> (em °C)	Equatorial	0.61	2.54	1.57	1.31	3.93	2.31	-0.36	2.02	0.88	0.23	2.62	1.32
	Temperado	0.80	2.68	1.63	0.85	3.07	1.84	-0.13	1.40	0.38	0.20	1.53	0.65
	Tropical Brasil Central	0.69	3.42	1.85	1.57	4.94	2.73	-0.32	1.76	0.68	0.31	2.47	1.18
	Tropical Nordeste Oriental	0.79	1.39	1.08	1.36	2.43	1.86	0.22	1.29	0.97	0.49	1.09	0.87
	Tropical Zona Equatorial	0.54	1.97	1.07	1.31	3.46	2.33	0.13	1.97	0.92	0.08	1.59	0.93
<b>RX1day</b> (em mm)	Equatorial	-8.27	11.28	0.72	-8.83	9.68	1.04	-10.55	4.94	-2.51	-12.25	4.79	-2.92
	Temperado	-12.12	11.39	1.74	-9.93	10.79	2.45	-6.45	12.86	5.03	-10.49	16.36	3.44
	Tropical Brasil Central	-22.48	10.07	-4.48	-18.61	11.79	-3.72	-9.54	8.91	-1.28	-12.94	12.29	-2.91
	Tropical Nordeste Oriental	-20.67	3.94	-3.80	-13.55	11.87	-0.59	-5.48	16.23	3.06	-7.09	14.11	2.27
	Tropical Zona Equatorial	-10.12	6.26	-1.20	-7.95	7.73	-1.79	-5.05	4.27	-0.52	-6.39	8.30	-0.55
<b>Temp7dias</b> (em °C)	Equatorial	0.60	3.42	1.95	0.66	4.03	2.72	0.69	2.65	1.86	0.54	2.59	1.86
	Temperado	0.33	4.08	2.69	-0.12	5.26	3.71	-0.50	0.88	0.16	-1.21	1.56	0.30
	Tropical Brasil Central	0.29	4.26	2.50	1.01	5.32	3.37	0.14	2.27	1.39	0.72	2.84	1.91
	Tropical Nordeste Oriental	-0.08	1.61	0.47	0.30	2.48	1.12	0.74	1.44	1.08	0.81	1.80	1.21
	Tropical Zona Equatorial	0.55	2.21	1.32	0.90	2.80	1.83	0.61	2.18	1.22	0.68	2.24	1.24



**Figura 22.** Anomalias para T<sub>N</sub> (em °C) - Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5

Fonte: Elaboração própria



**Figura 23.** Anomalias para Tn (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5

Fonte: Elaboração própria

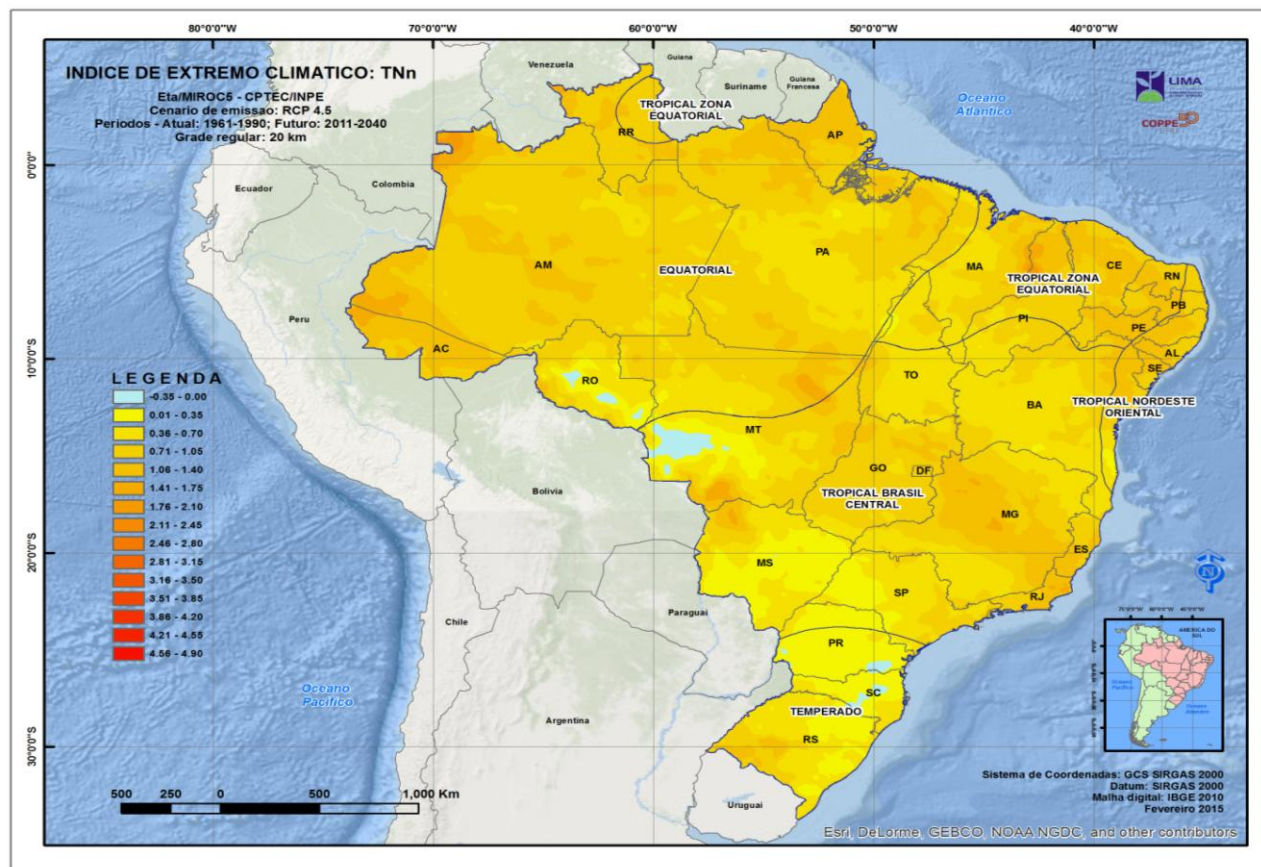


Figura 24. Anomalias para TNn (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 4.5

Fonte: Elaboração própria

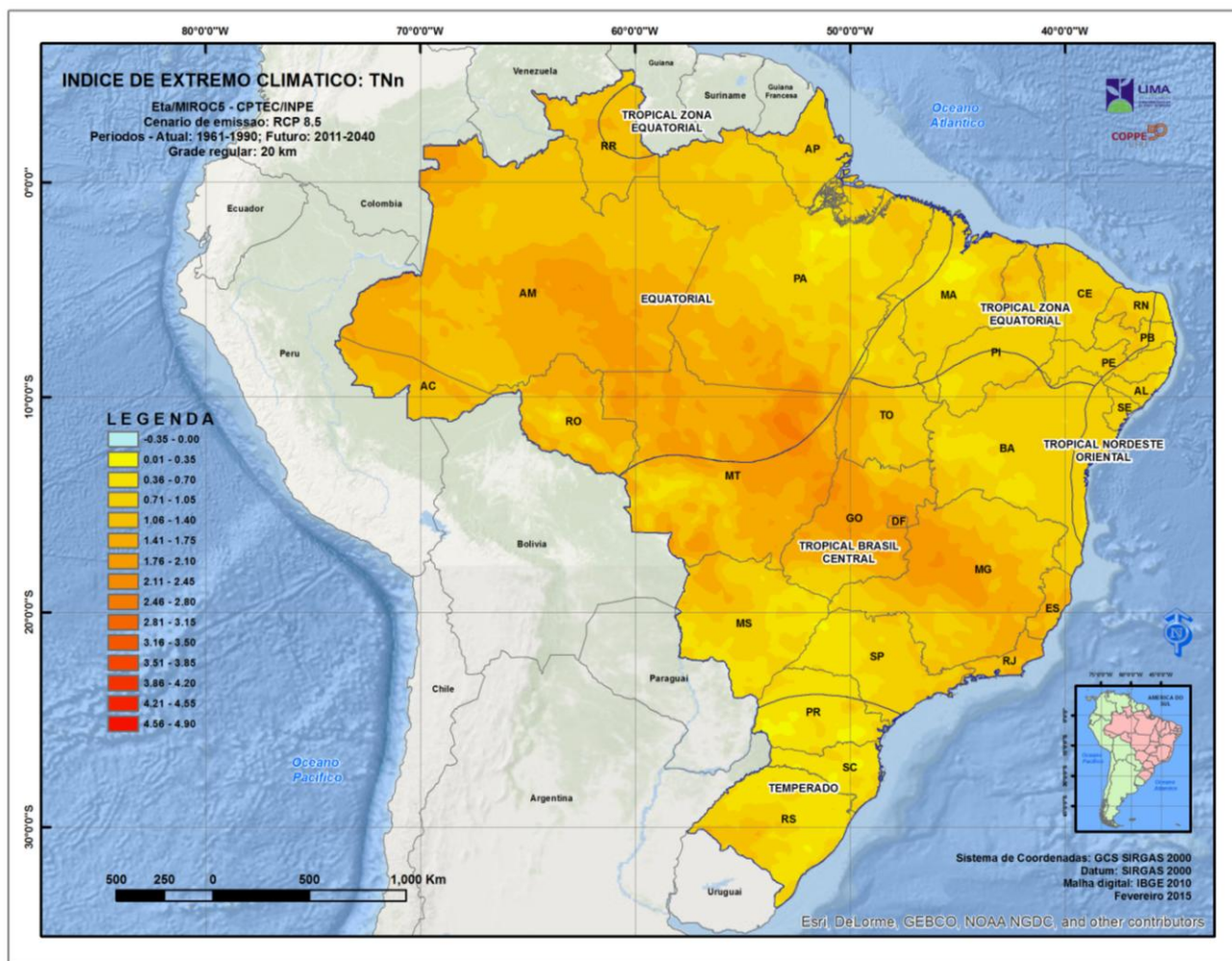
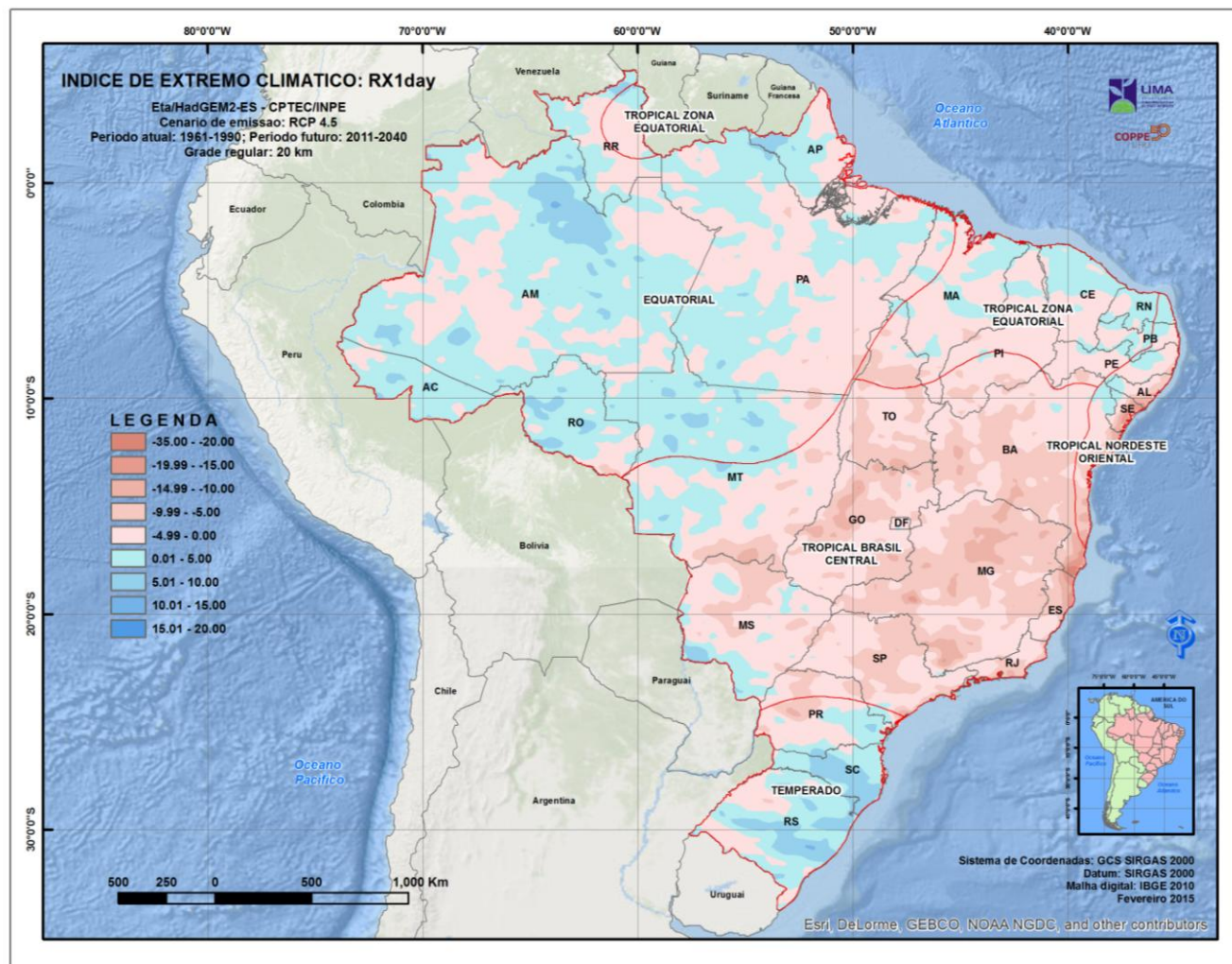


Figura 25. Anomalias para TNn (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 8.5

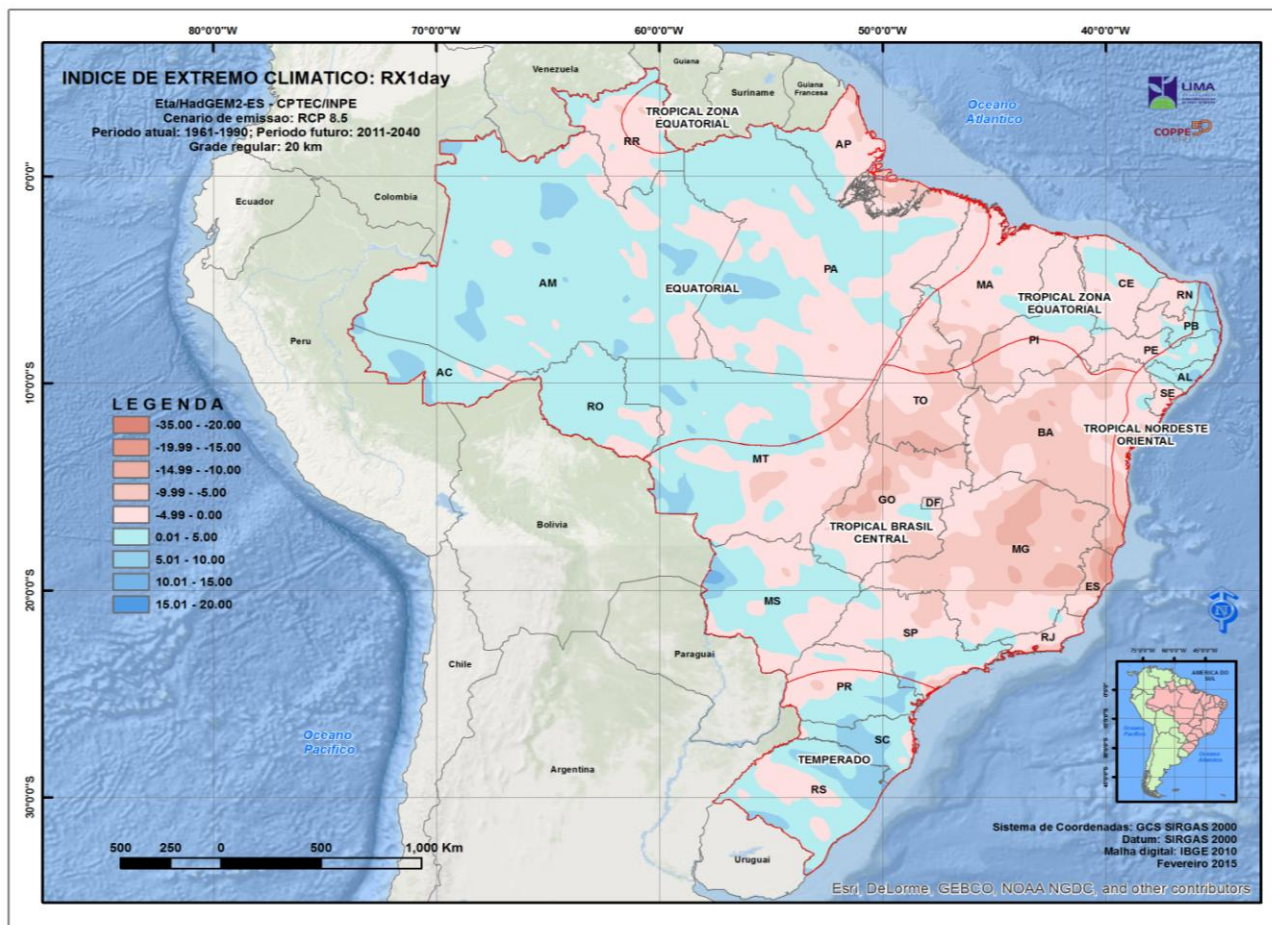
Fonte: Elaboração própria



**Figura 26.** Anomalias para RX1day (em mm) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5

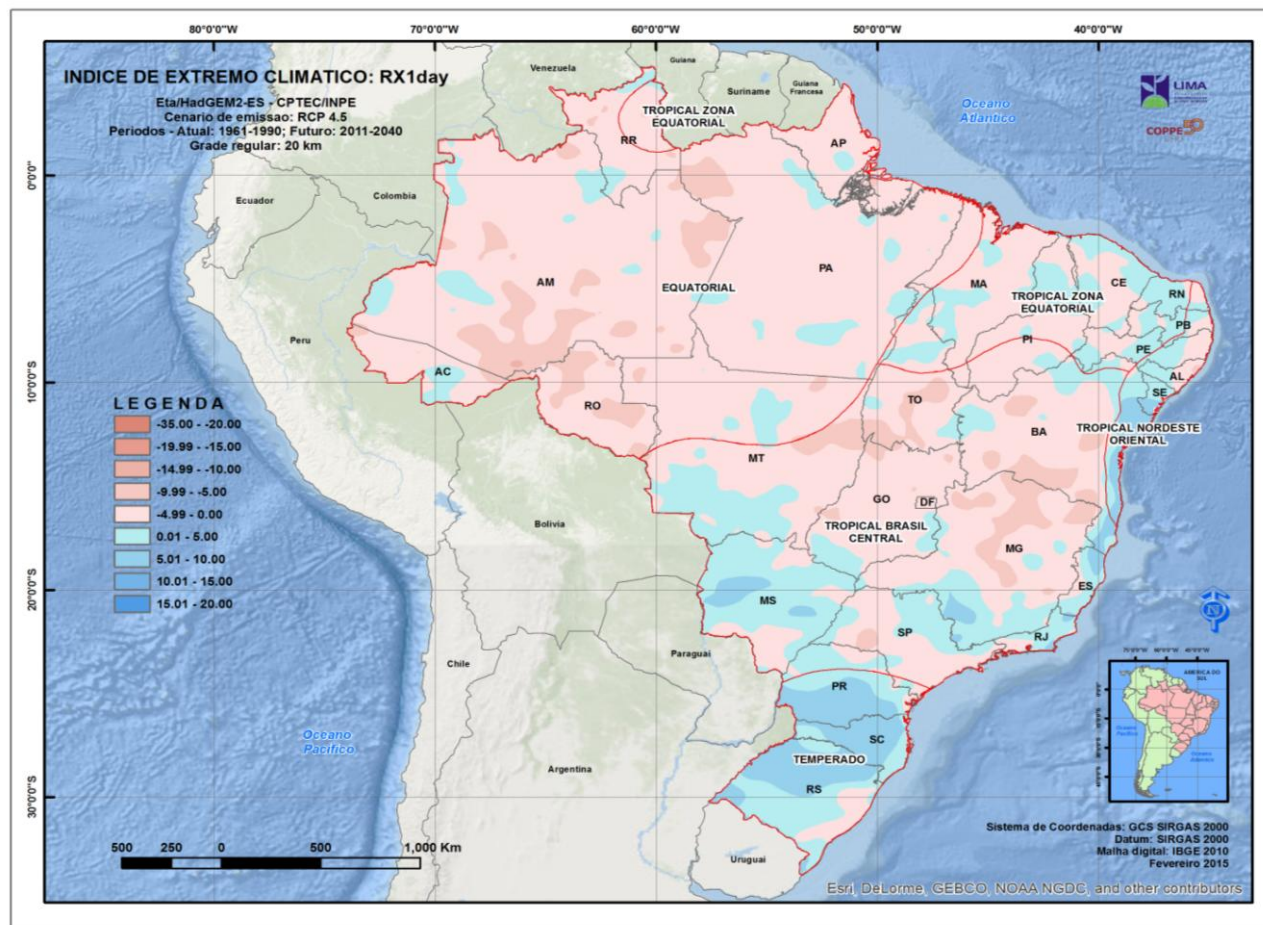
Fonte: Elaboração própria





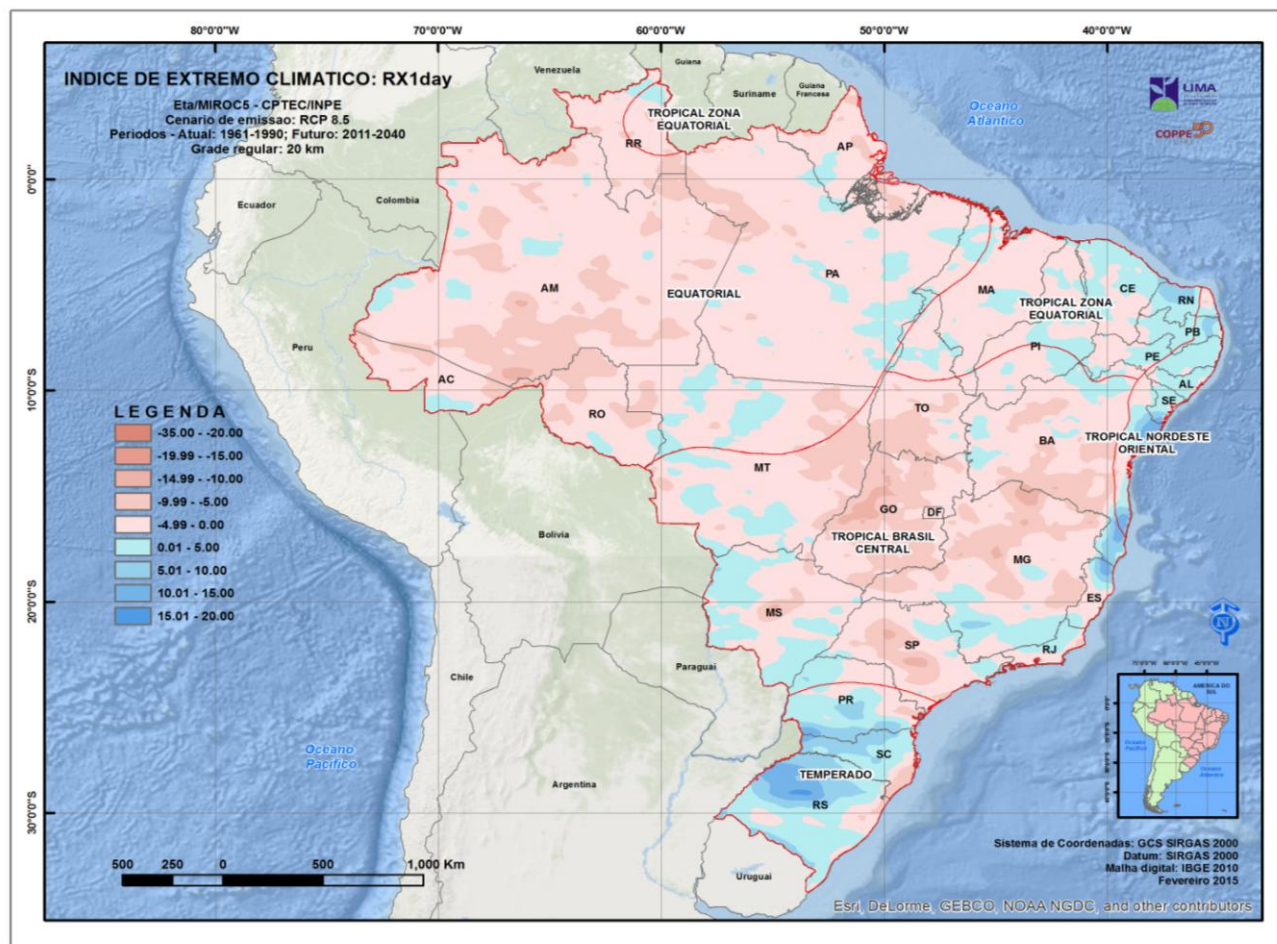
**Figura 27.** Anomalias para RX1day (em mm) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5.

Fonte: Elaboração própria



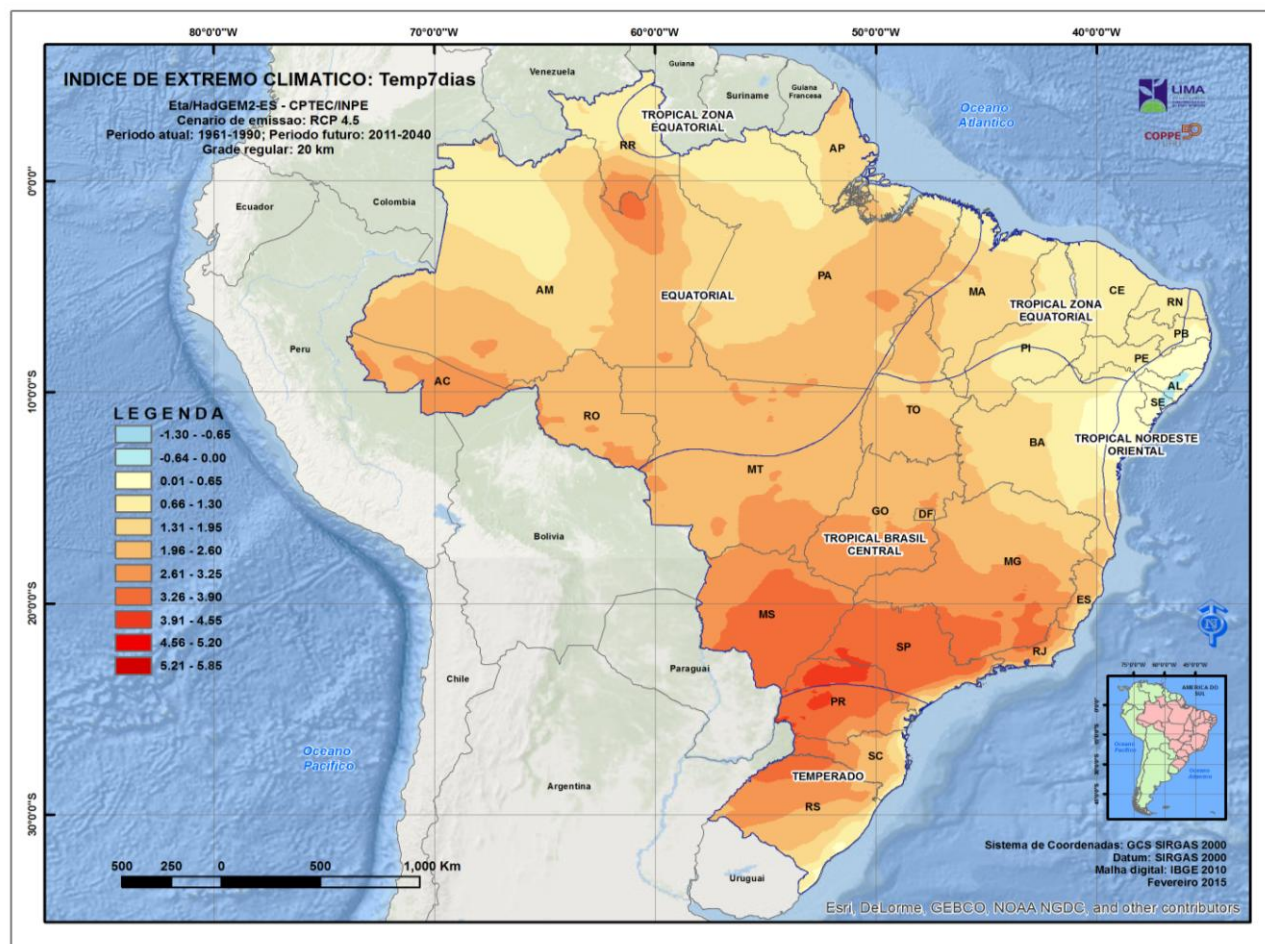
**Figura 28.** Anomalias para RX1day (em mm) – Eta/MIROC5, RCP 4.5

Fonte: Elaboração própria



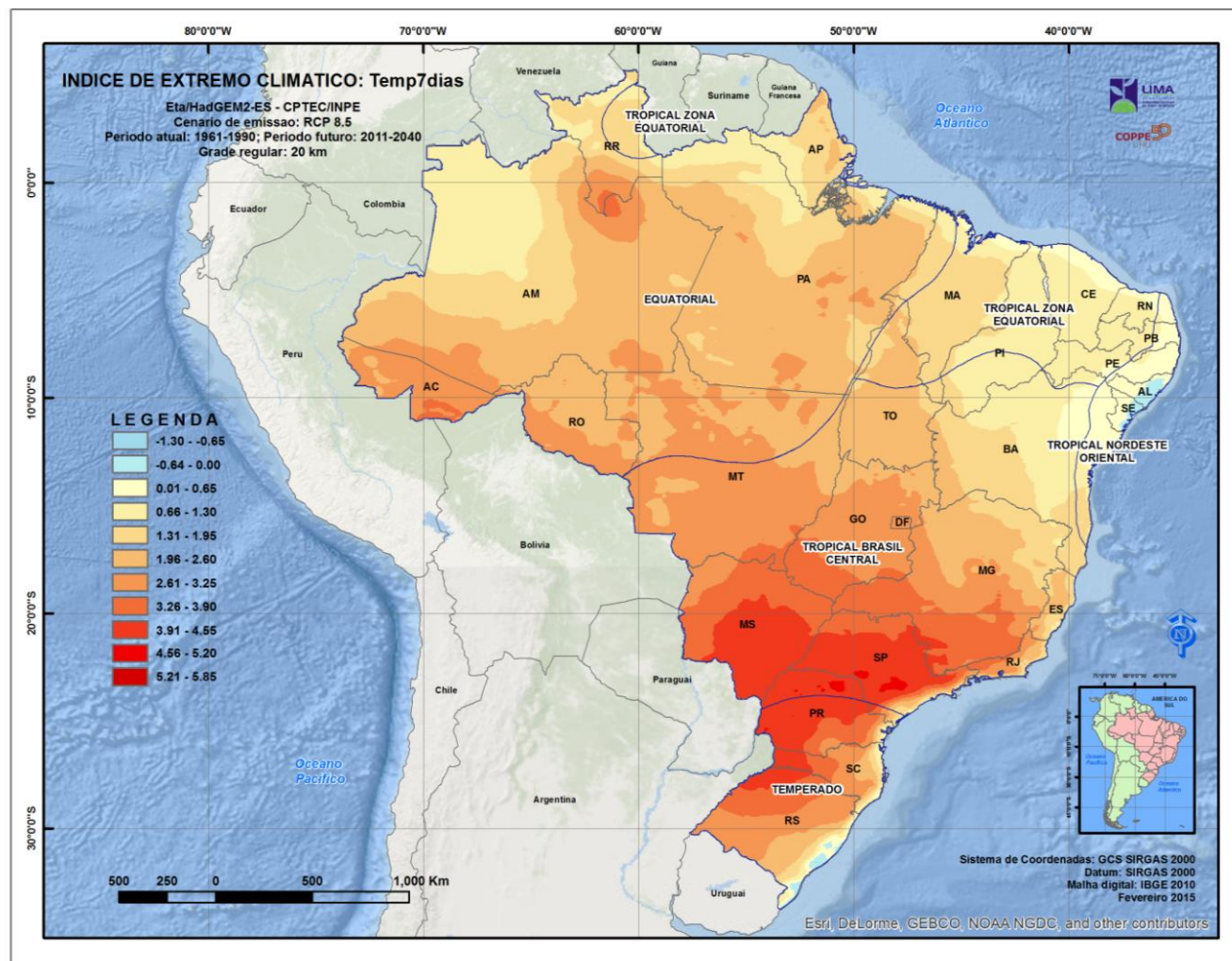
**Figura 29.** Anomalias para RX1day (em mm) – Eta/MIROC5, RCP 8.5

Fonte: Elaboração própria



**Figura 30.** Anomalias para Temp7dias (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5

Fonte: Elaboração própria



**Figura 31.** Anomalias para Temp7dias (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5

Fonte: Elaboração própria

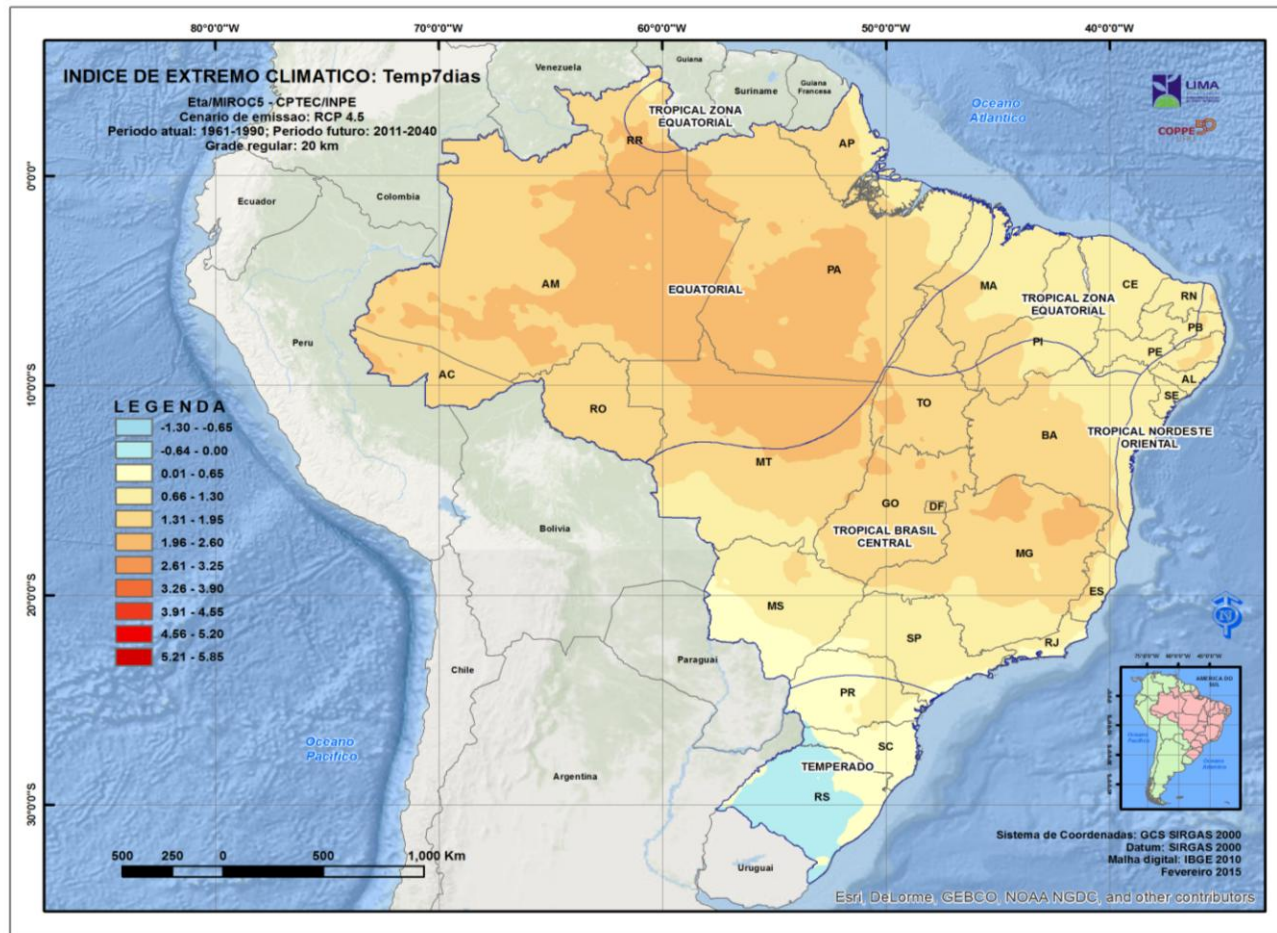
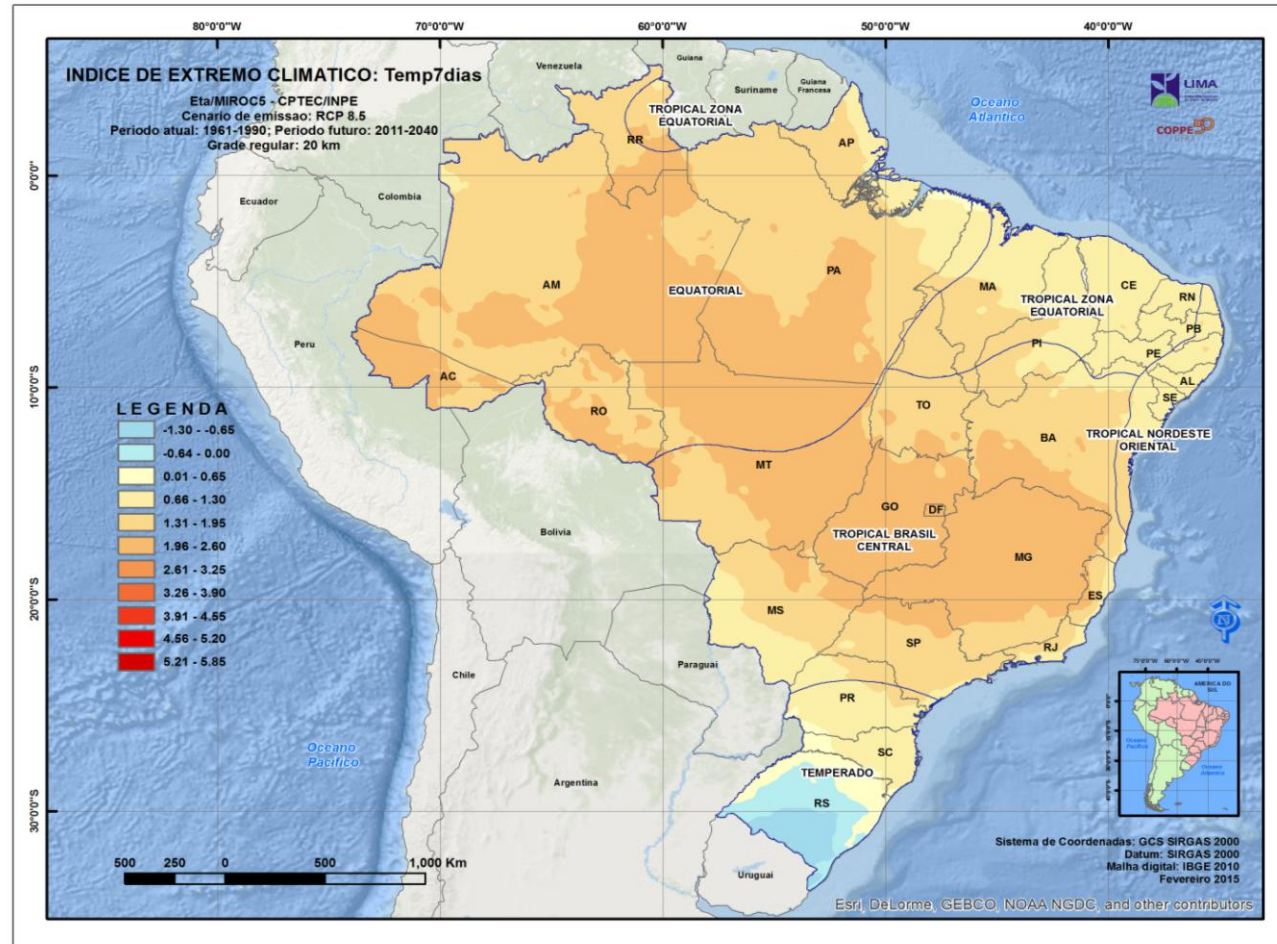


Figura 32. Anomalias para Temp7dias (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 4.5

Fonte: Elaboração própria



**Figura 33.** Anomalias para Temp7dias (em °C) – Eta/MIROG5, RCP 8.5

Fonte: Elaboração própria

#### **4.2.3. Valores absolutos dos índices de extremos climáticos – Período futuro 2011-2040**

O Quadro 12 apresenta a síntese resultados obtidos para os valores absolutos dos extremos climáticos, para os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5, dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, período de integração 2011-2014.

Adicionalmente, as Figuras 34 a 45 apresentam a espacialização dos resultados, considerando as zonas climáticas.



**Quadro 12.** Valores de extremos climáticos para os modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, RCP 4.5 e RCP 8.5, por zona climática, período 2011-2040

	Zona climática	Eta/HadGEM2-ES RCP 4.5			Eta/HadGEM2-ES RCP 8.5			Eta/MIROC5RCP 4.5			Eta/MIROC5RCP 8.5		
		Min.	Max.	Média	Min.	Max.	Média	Min.	Max.	Média	Min.	Max.	Média
<b>TNn</b> (em °C)	Equatorial	11.09	24.25	16.62	11.38	24.68	17.36	5.340	22.947	13.794	27.19	39.93	36.94
	Temperado	-3.56	13.93	1.90	-3.07	14.50	2.11	-5.703	11.080	-0.424	24.29	39.75	32.81
	Tropical Brasil Central	1.98	17.62	9.95	2.26	18.69	10.84	-0.727	16.530	7.009	24.31	41.61	35.28
	Tropical Nordeste Oriental	11.21	20.81	14.91	12.13	21.22	15.70	10.773	19.857	14.306	28.86	36.49	32.69
	Tropical Zona Equatorial	11.10	22.82	15.98	11.96	23.35	17.23	10.367	21.953	14.592	28.38	38.78	35.36
<b>RX1day</b> (em mm)	Equatorial	14.19	71.53	45.05	14.67	64.97	45.42	25.03	67.14	44.05	22.99	67.86	43.63
	Temperado	37.90	94.08	64.14	39.97	92.29	64.79	43.69	112.00	63.51	41.56	100.02	61.96
	Tropical Brasil Central	11.66	95.21	37.39	12.60	89.84	38.23	19.96	124.80	48.06	21.04	115.66	46.45
	Tropical Nordeste Oriental	11.20	68.42	34.07	10.94	80.72	37.32	16.80	118.43	64.92	15.66	124.90	64.14
	Tropical Zona Equatorial	13.39	62.80	33.97	11.05	59.84	33.28	16.46	52.93	36.51	18.55	55.66	36.47
<b>Temp7dias</b> (em °C)	Equatorial	25.97	41.23	35.43	25.92	43.63	36.23	25.20	40.15	35.11	23.26	41.03	35.05
	Temperado	25.33	45.94	34.69	24.83	44.69	34.25	20.98	38.41	29.75	19.83	41.44	29.98
	Tropical Brasil Central	26.82	44.92	36.94	24.39	45.68	36.84	21.18	41.76	31.86	21.27	43.90	32.59
	Tropical Nordeste Oriental	27.43	37.03	32.08	27.16	39.37	33.62	26.32	36.87	31.06	26.41	37.44	31.23
	Tropical Zona Equatorial	27.48	40.14	35.10	28.51	41.91	36.03	26.27	39.77	34.47	26.62	40.21	34.49

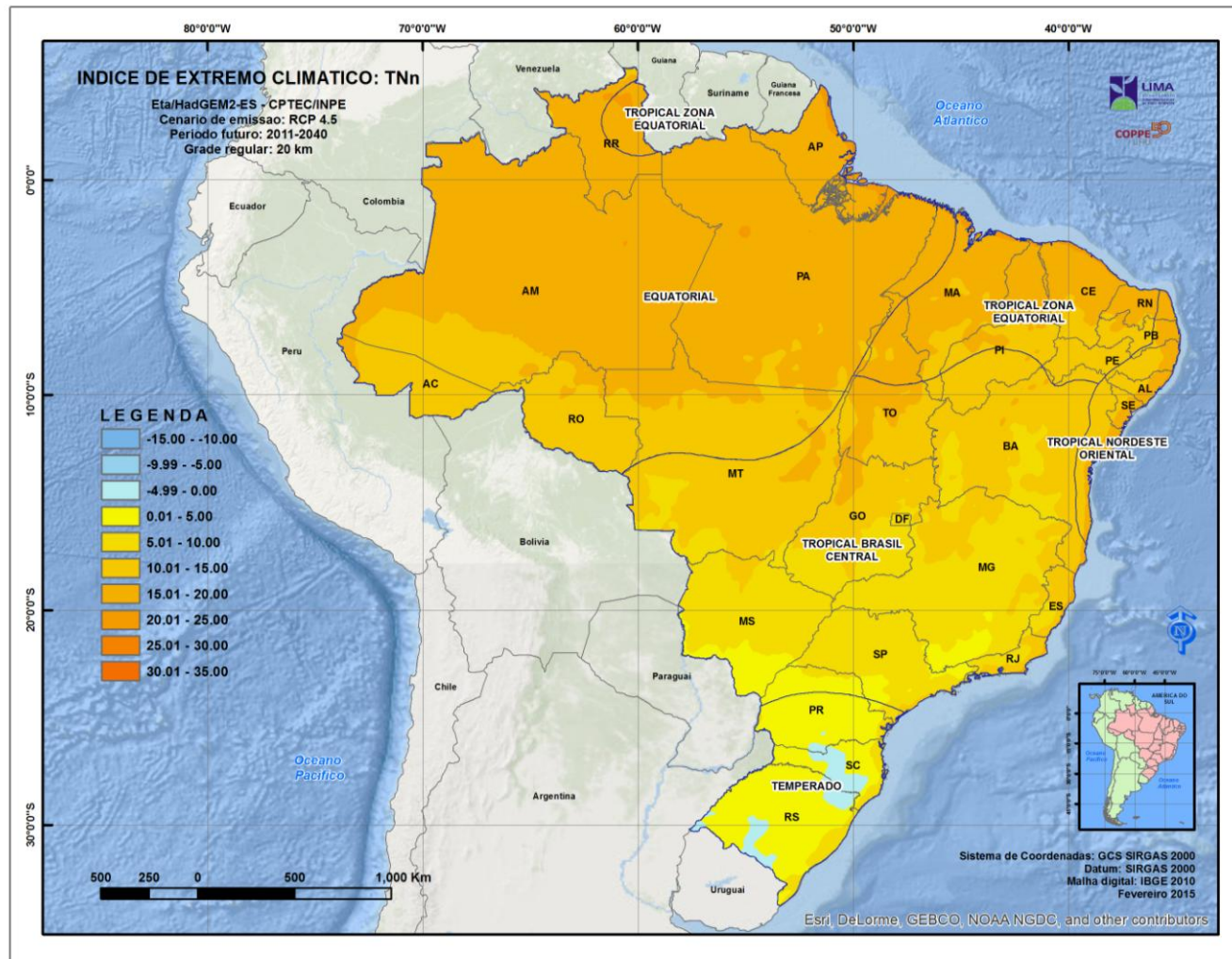


Figura 34. TNn (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria

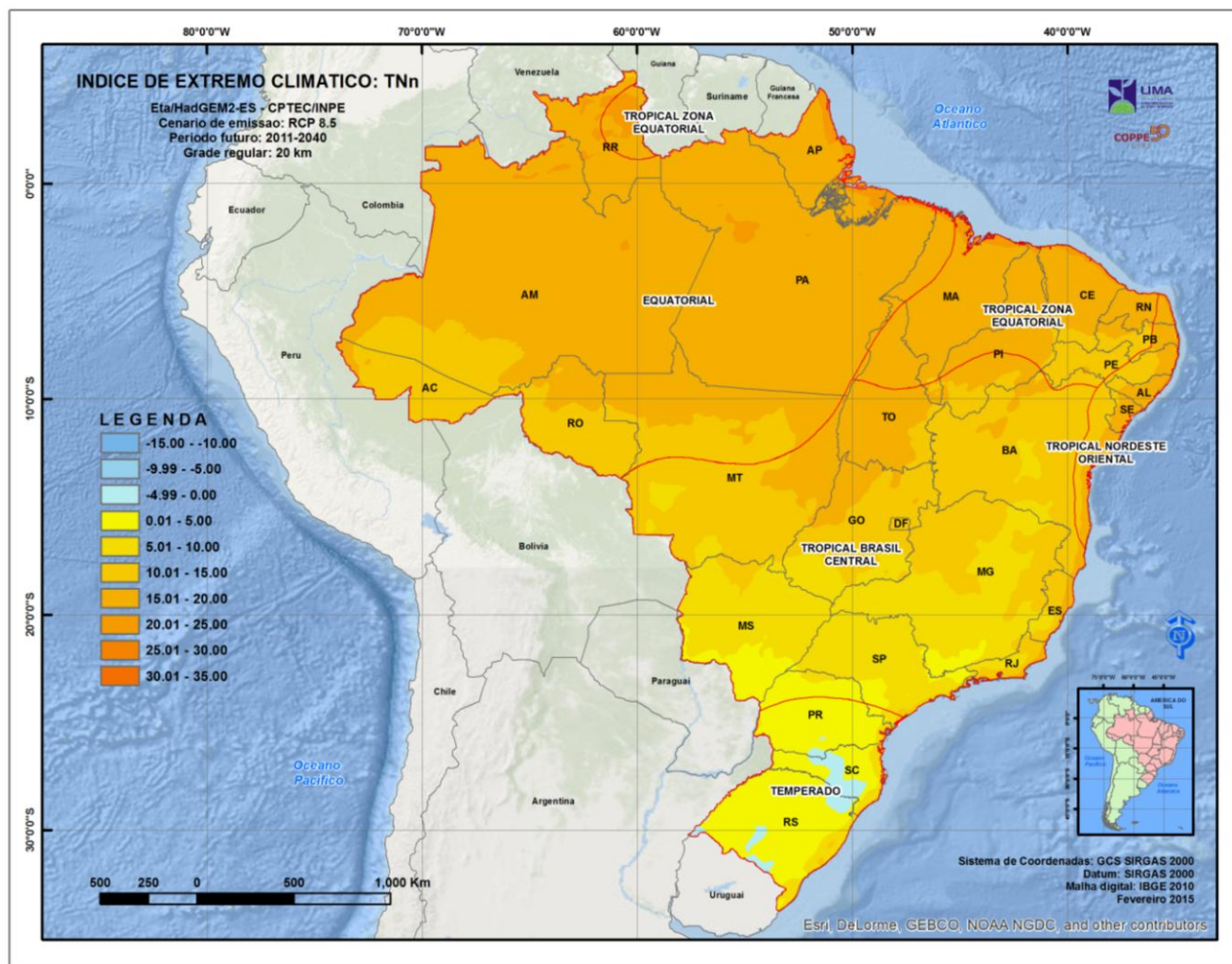


Figura 35. TNn (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria

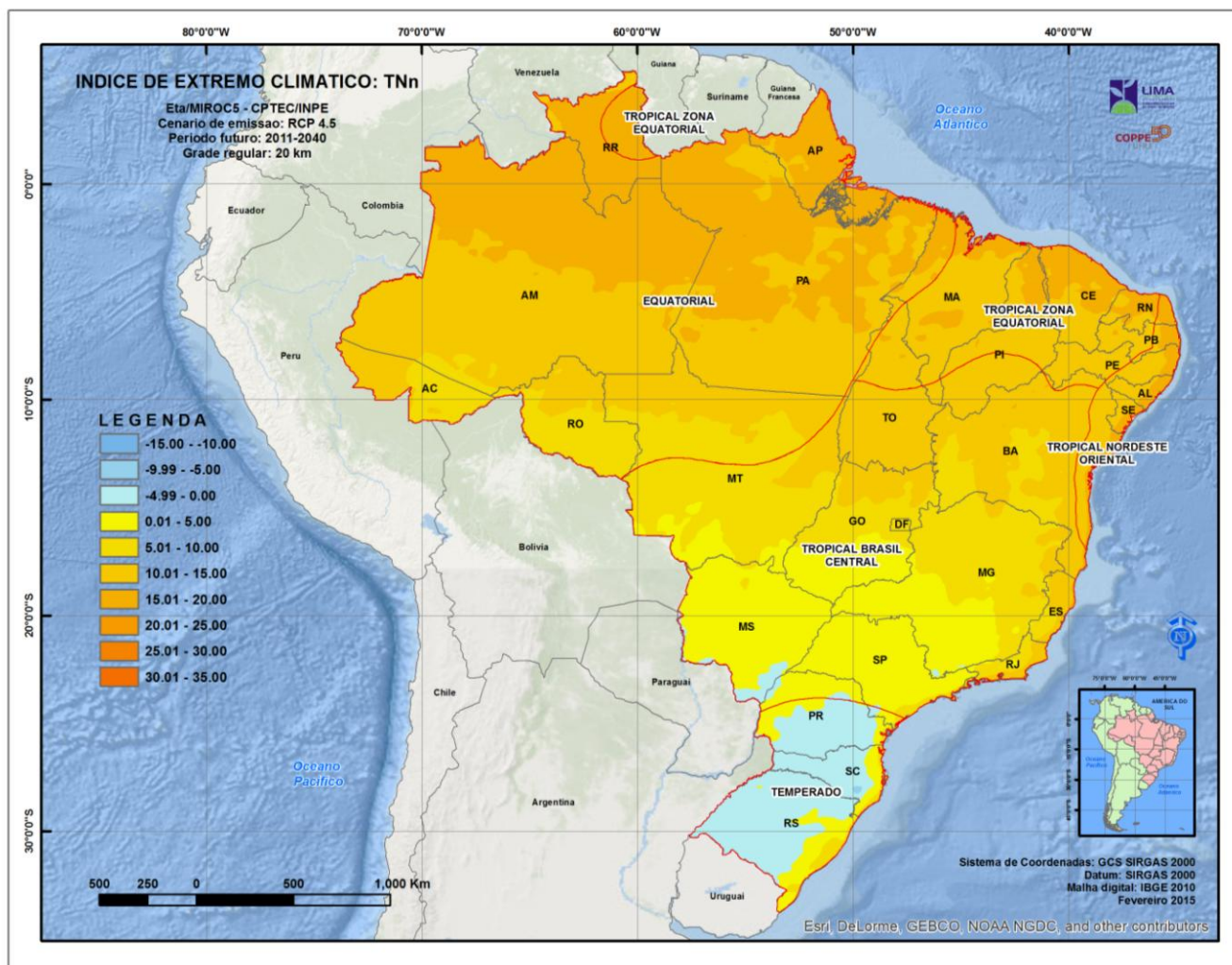


Figura 36. Tn (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 4.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria

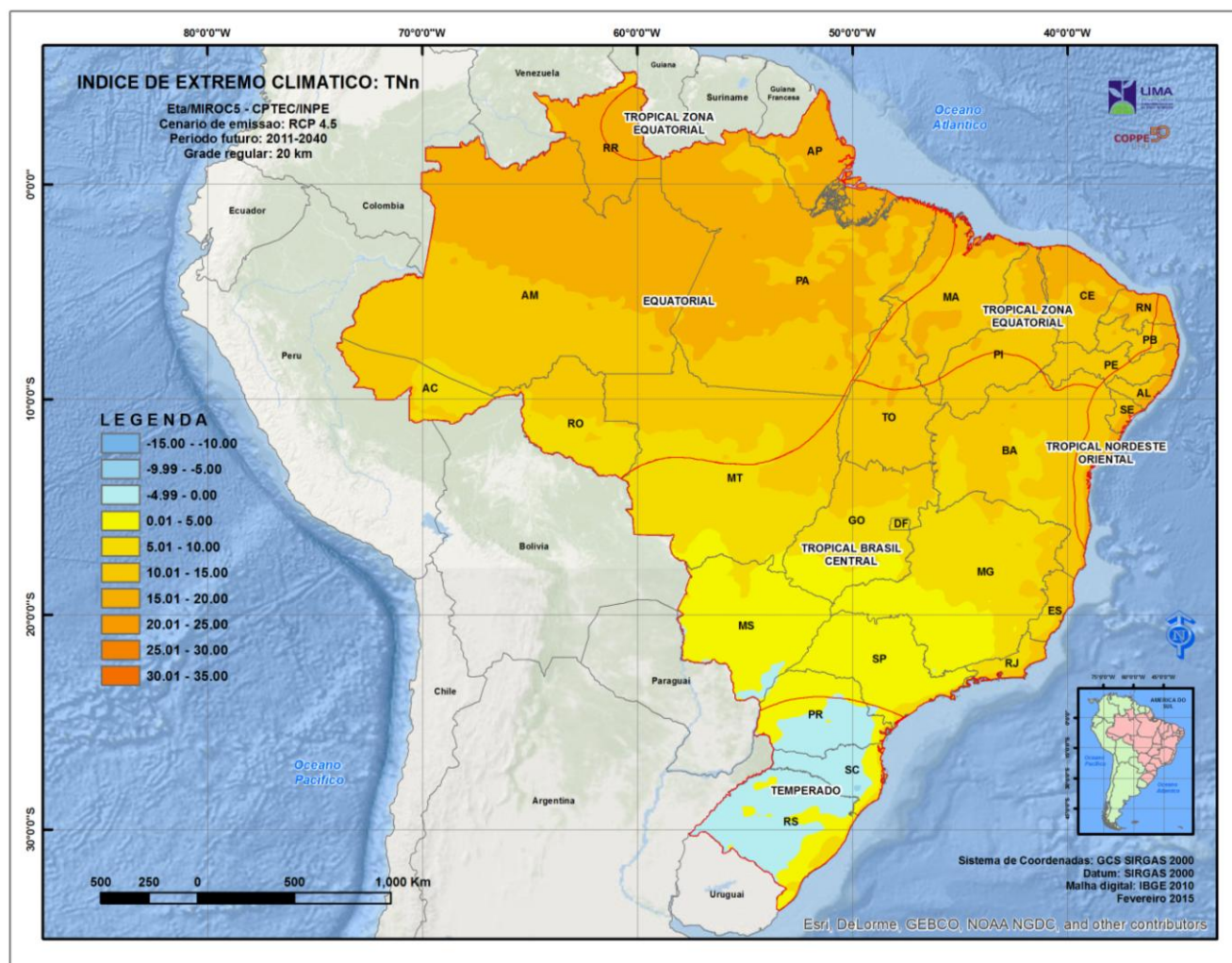


Figura 37. Tn (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 8.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria

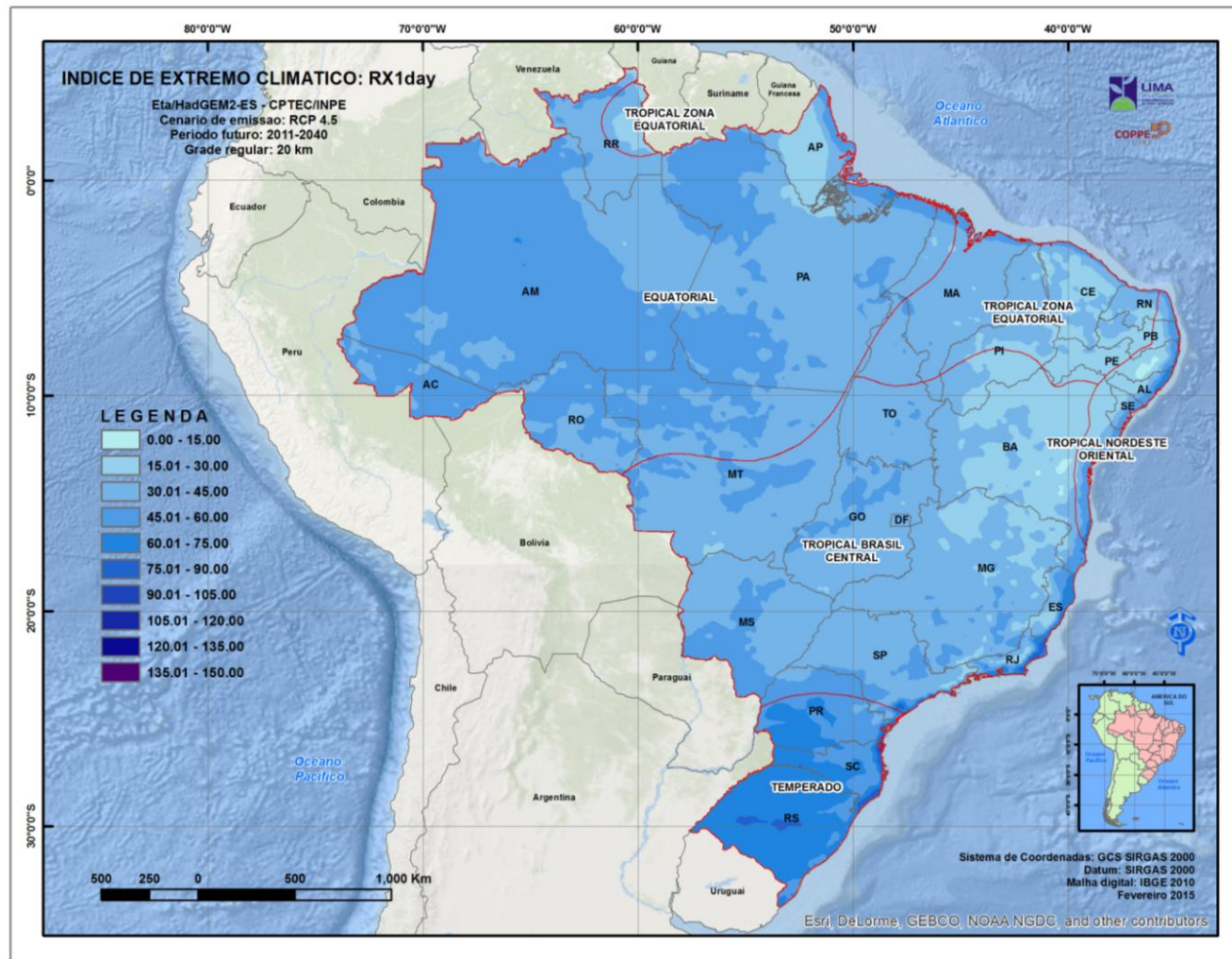
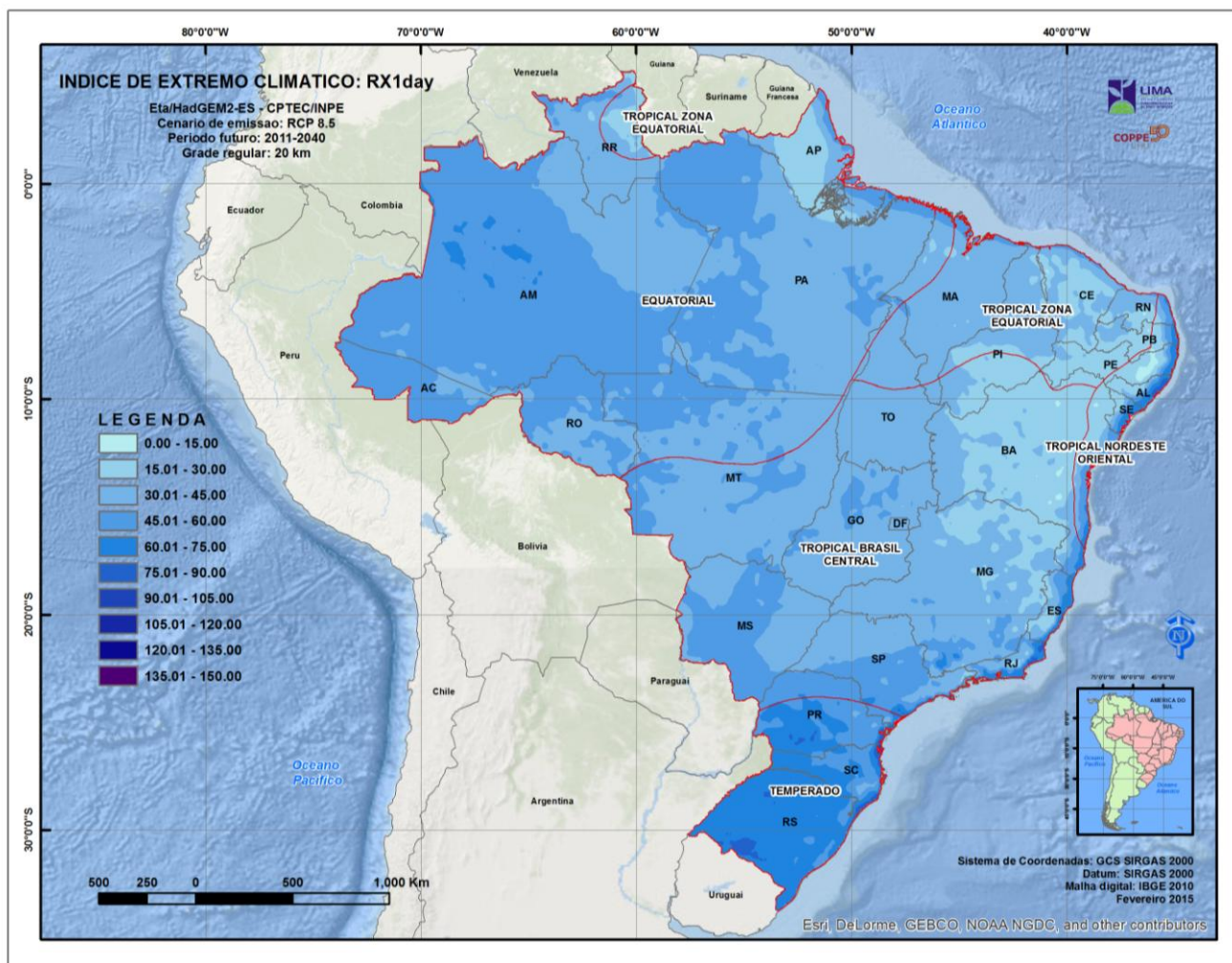


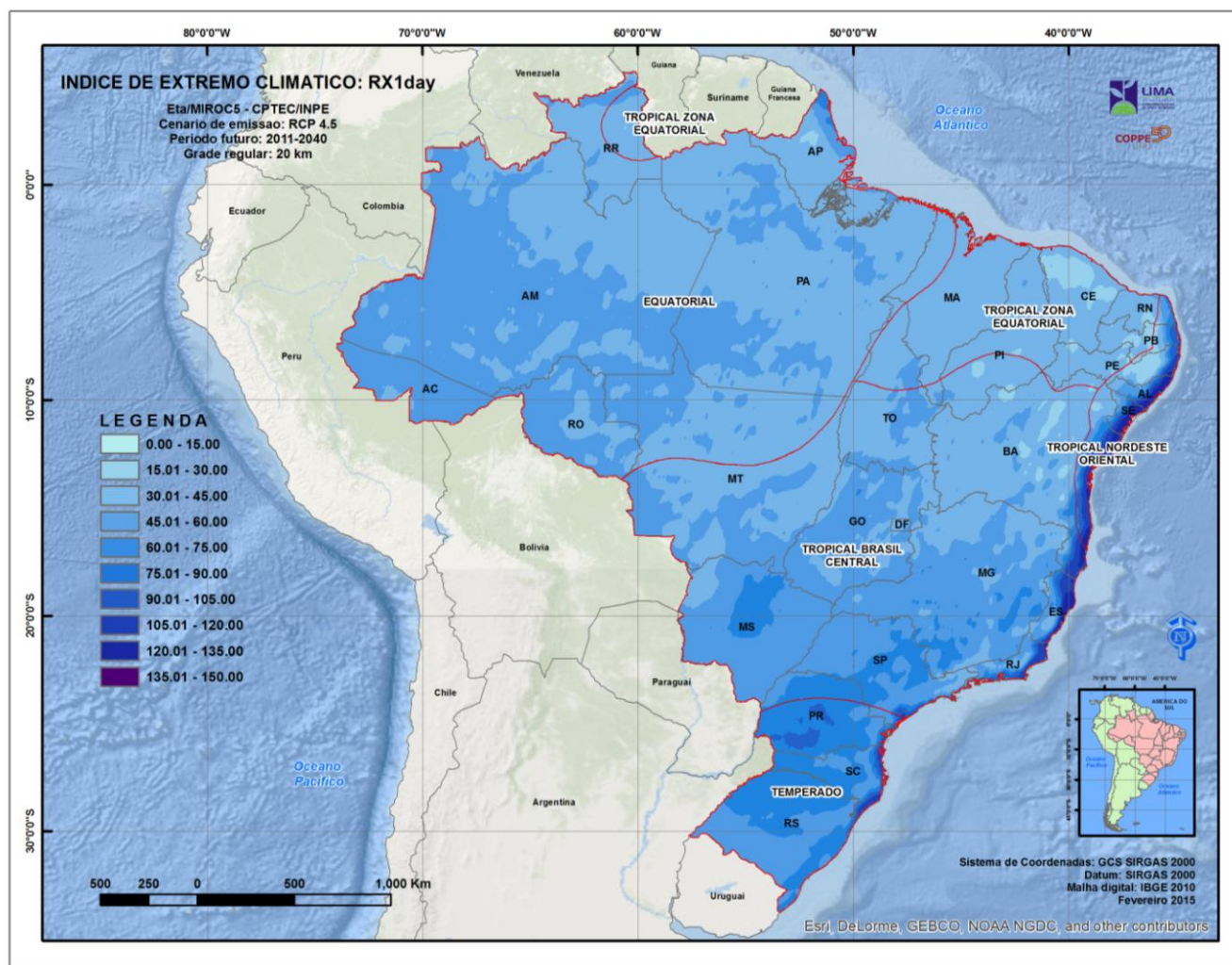
Figura 38. RX1day (em mm/dia) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria



**Figura 39.** RX1day (em mm/dia) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5. Período futuro: 2011-2040

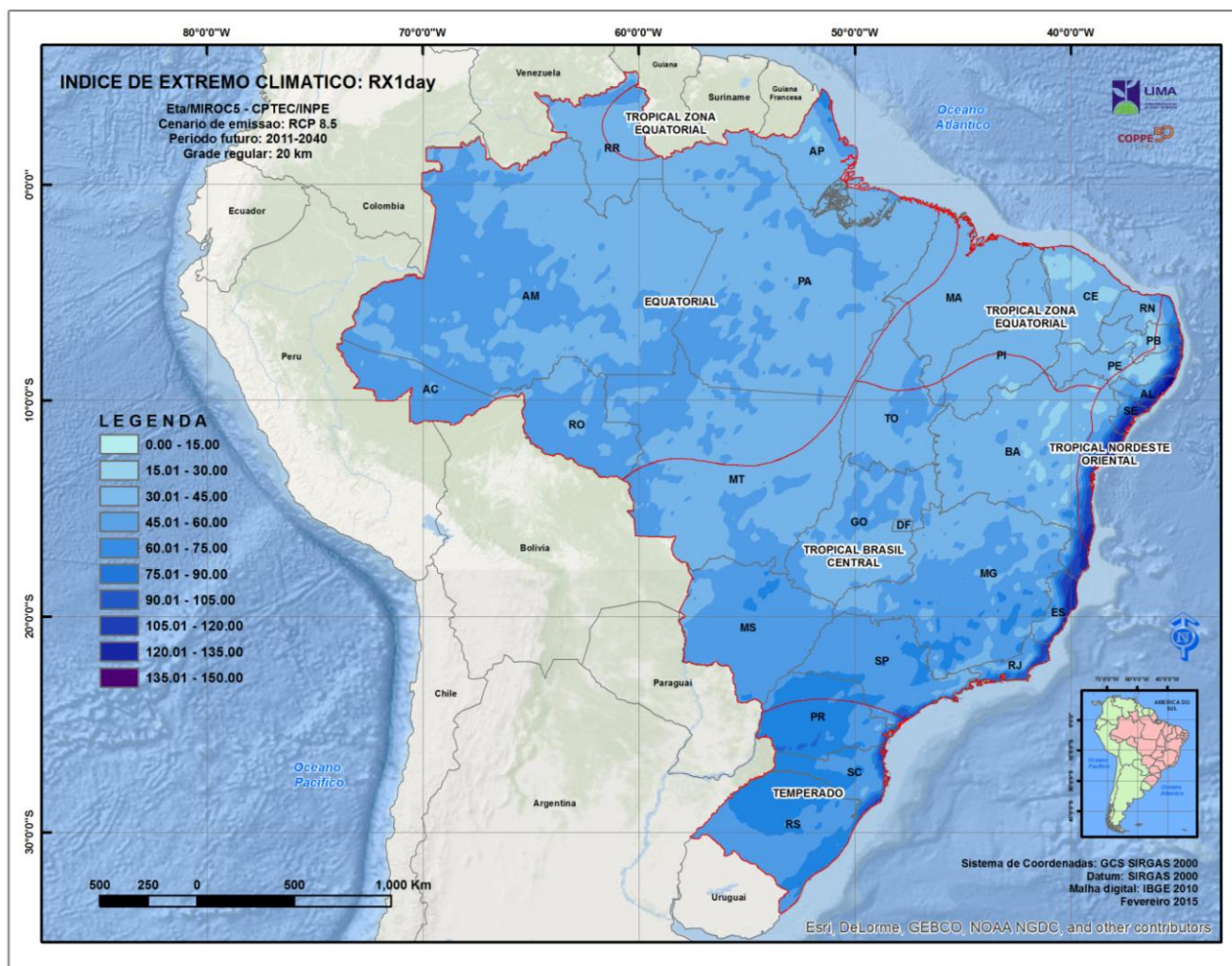
Fonte: Elaboração própria



**Figura 40.** RX1day (em mm/dia) – Eta/MIROC5, RCP 4.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria





**Figura 41.** RX1day (em mm) – Eta/MIROC5, RCP 8.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria

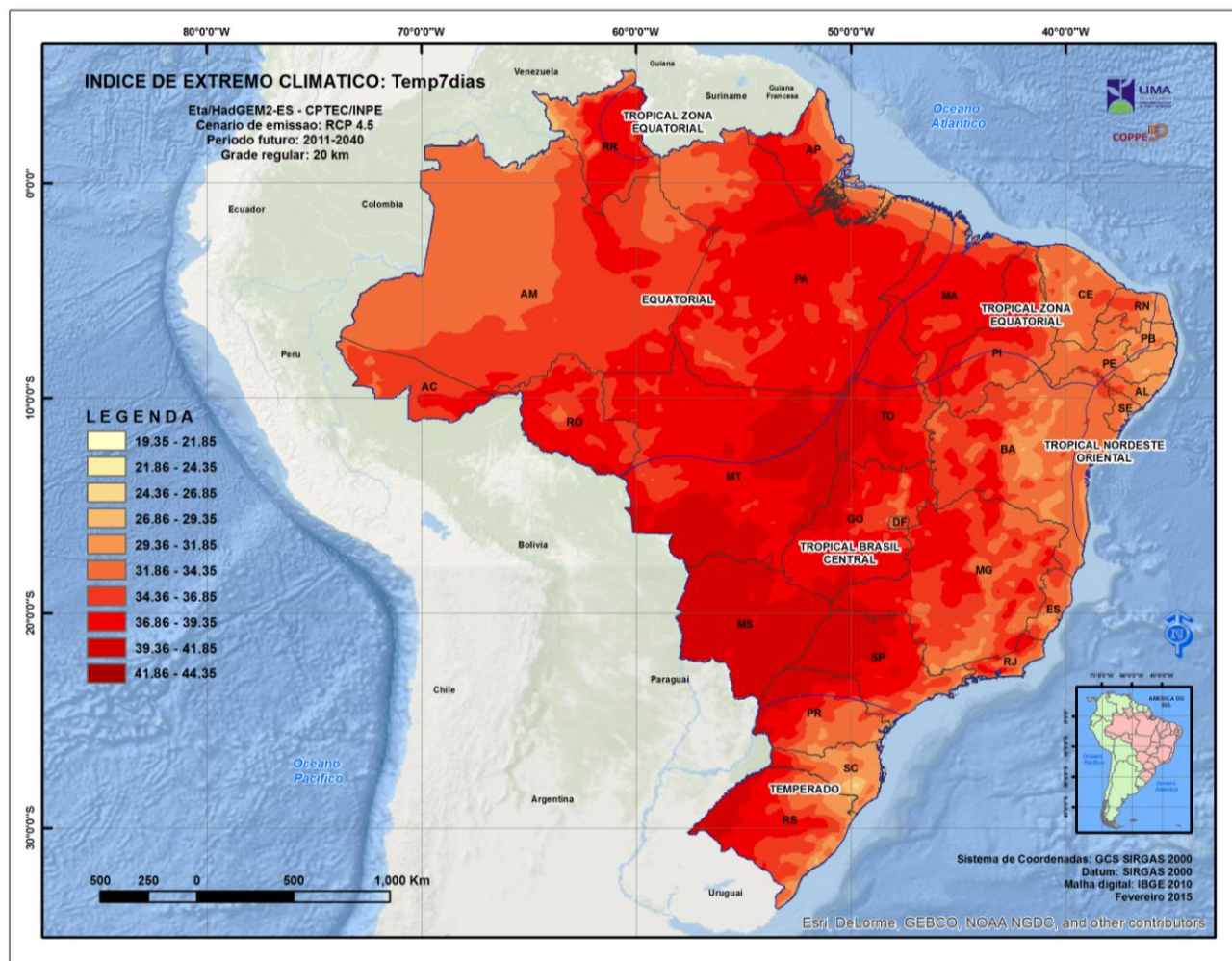
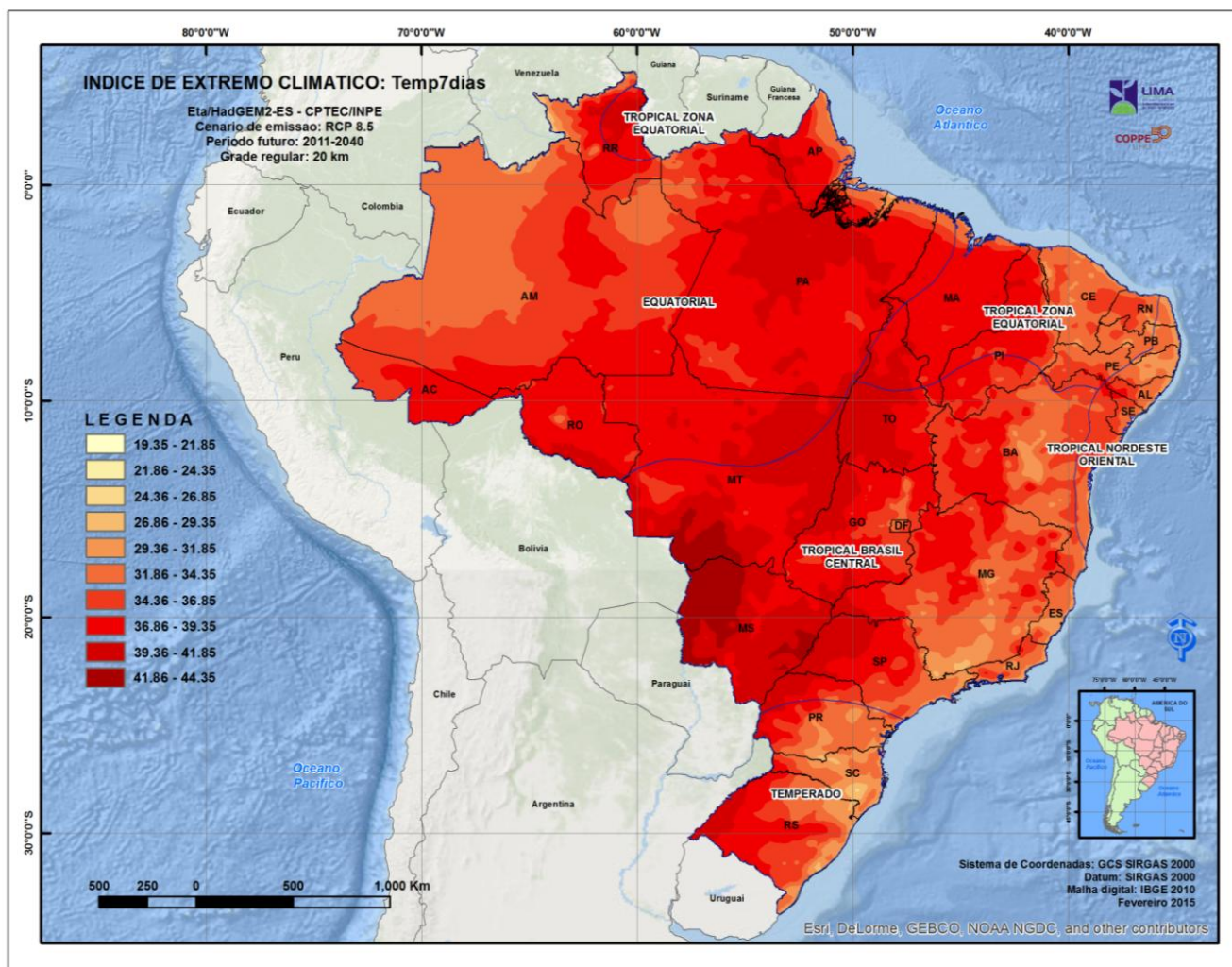


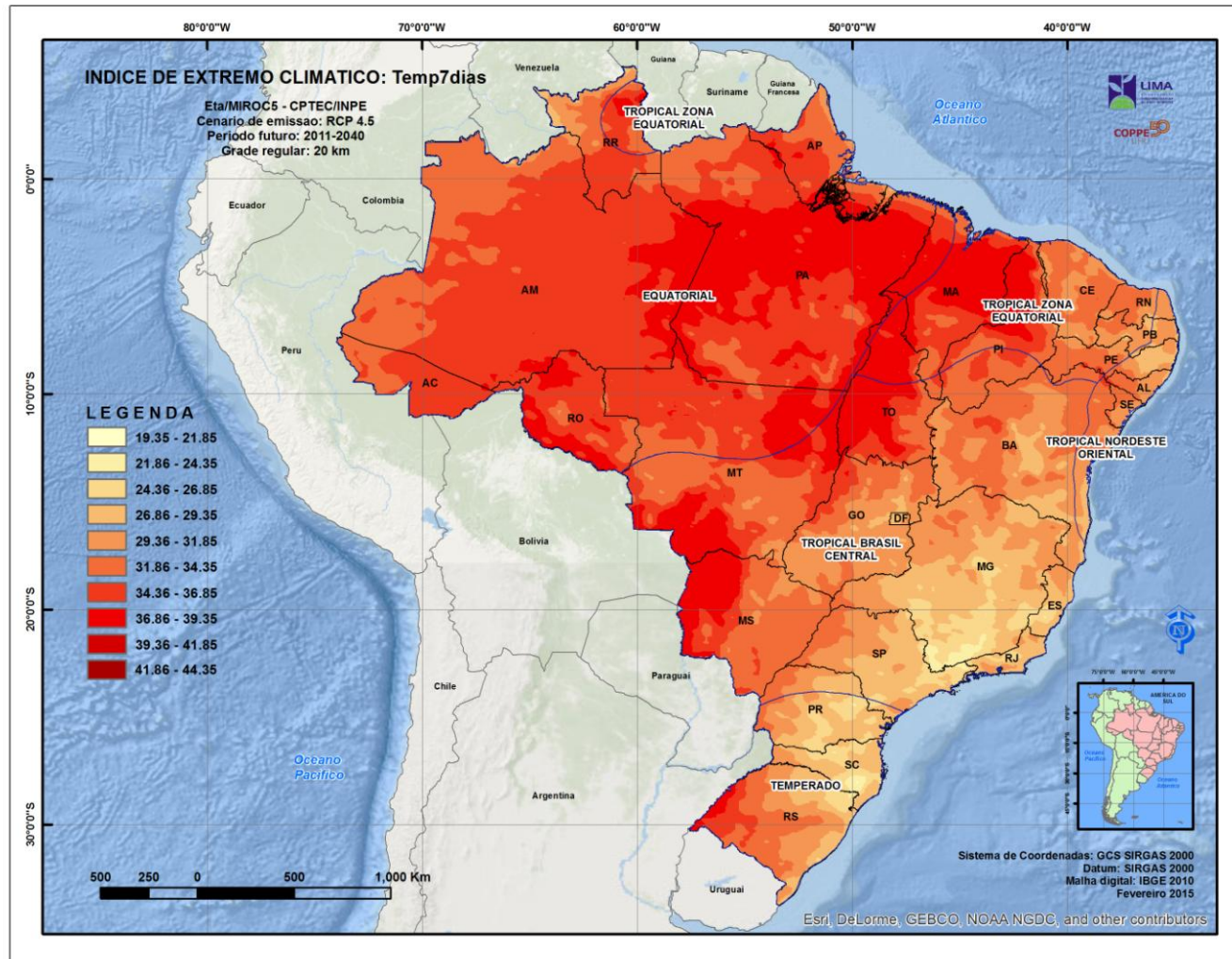
Figura 42. Temp7dias (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria



**Figura 43.** Temp7dias (em °C) – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria



**Figura 44.** Temp7dias (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 4.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria

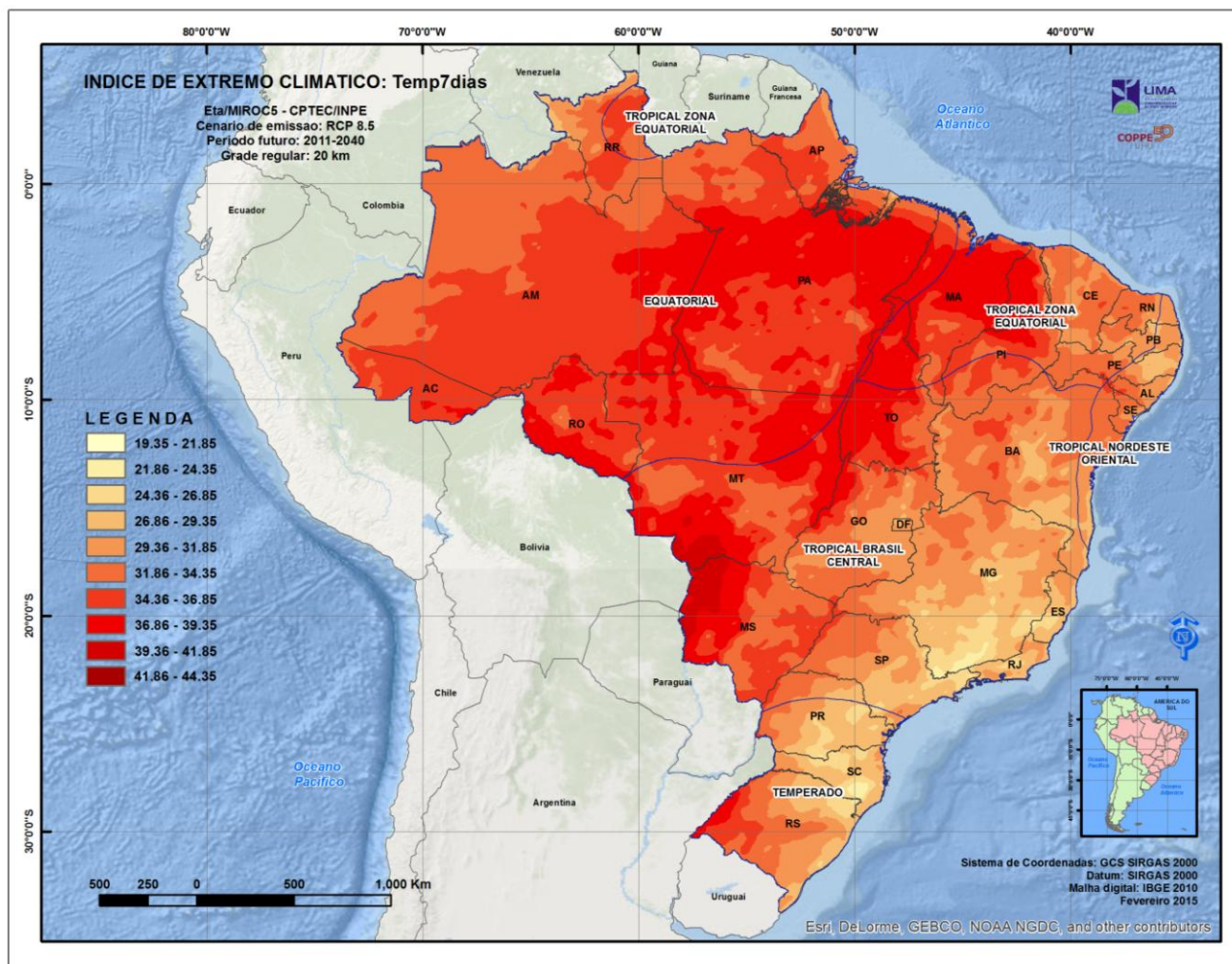


Figura 45. Temp7dias (em °C) – Eta/MIROC5, RCP 8.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria

#### 4.2.4. Índices de extremos climáticos – Análise dos resultados

- **Análise de Tendências**

A seguir, é apresentada a análise de tendência anual para os índices de extremos climáticos TNn, RX1day e Temp7dias, considerando o *baseline* (série de integração 1961-1990) e os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5 (série de integração 2011-2040), dos modelos climáticos Eta/HadGEM2-RES e Eta/MIROC5.

Na análise das tendências de precipitações e temperaturas, foram considerados séries de dados contendo os totais acumulados anuais, para a precipitação pluviométrica, e média anual, para a temperatura do ar, as quais foram submetidas ao teste estatístico de Mann-Kendall e Curvatura de Sem (Mann, 1945; Kendall, 1975). Trata-se de um teste não-paramétrico sugerido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), para avaliação da tendência em séries temporais de dados ambientais (Yu *et al.*, 2002).

De acordo com Goossens e Berger (1986), o teste sequencial de Mann-Kendall (Sneyers, 1975) é o método mais apropriado para analisar mudanças climáticas em séries climatológicas, permitindo detectar e localizar, de forma aproximada, o ponto inicial de determinada tendência.

Para Önöz e Bayazit (2003), os benefícios do teste de Mann-Kendall são a irrelevância dos dados não pertencerem a uma distribuição particular e o fato do resultado ser menos influenciado por *outliers*, pois o cálculo se baseia no sinal das diferenças, e não diretamente nos valores das variáveis.

A análise da tendência climática possibilita verificar se houve manutenção, aumento ou diminuição nos valores das variáveis climatológicas, consideradas em uma determinada série temporal. Considera-se que, na hipótese de estabilidade de uma série, a sucessão de valores ocorre de forma independente, e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma (série aleatória simples).

A presença de tendência estatisticamente, significativa ou não, foi avaliada pelo valor de Z. Essa estatística é usada para testar a hipótese nula ( $H_0$ ), ou seja, inexistência de tendência: se a probabilidade  $p$  do Teste de Mann-Kendall for menor que o nível  $\alpha$  ( $p < \alpha$ ), uma tendência estatisticamente significativa existe, enquanto um valor de  $p > \alpha$  atesta tendência não significativa. Para amostras onde não há tendência, o valor de Z é próximo ou igual a zero e o valor de  $p$  se aproxima de  $\alpha$ .

No presente estudo, foi adotado o nível de significância  $\alpha = 0,05$  (= 5%), seguindo estudos como o de Moraes *et al.* (1995), Back (2001) e Marengo *et al.* (2007). Portanto, a hipótese nula ( $H_0$ ) deve ser rejeitada sempre que o valor de Z estiver fora do intervalo de confiança -1,96 - +1,96.

O Quadro 13 apresenta os intervalos de Z que delimitam o perfil das tendências observadas nas séries anuais dos dados climáticos.

**Quadro 13.** Referencial para o estabelecimento de tendências dos dados de clima

Significância	Legenda	Z
Sem tendência	ST	0
Tendência não significativa de aumento	TnSA	< +1,96
Tendência significativa de aumento	TSA	> +1,96
Tendência não significativa de redução	TnSR	> - 1,96
Tendência significativa de redução	TSR	< -1,96

Fonte: Elaboração própria.

Obs.: as cores associadas à legenda não contem juízo de valor, e servem apenas como referência para identificar, visualmente, o sentido da tendência. Assim, os padrões de verde estão associados a tendência de aumento, laranja e vermelho, a tendências de redução, e amarelo, a ausência de tendência.

Valores positivos de Z ( $Z > 0$ ) apontam para a existência de tendência crescente, ao passo que valores negativos ( $Z < 0$ ) indicariam tendência decrescente. Adicionalmente, quando  $Z > +1,96$ , a tendência de aumento pode ser considerada significativa e, se  $Z < +1,96$ , a tendência de aumento é não significativa. Porém, nos casos em que  $Z < -1,96$ , a tendência de redução é significativa, e, se  $Z > -1,96$ , a tendência de redução pode ser considerada como não significativa. Por fim, quando Z é próximo ou igual a 0, a série avaliada não apresenta tendência. O teste de Mann-Kendall foi aplicado separadamente para cada série de dados anuais.

Para obter a magnitude das tendências das séries, utilizou-se o método Curvatura de Sen (Sen, 1968), o qual, por ser insensível a valores *outliers* e dados ausentes, é mais rigoroso que a curvatura de regressão usual, ao mesmo tempo em que provê uma medida realística das tendências em séries temporais.

No Anexo III, encontram-se os gráficos de tendência e respectivas tabelas de análises para os cinco índices de extremos climáticos relativos aos modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, para ambos os cenários de emissão (RCP 4.5 e RCP 8.5), por zona climática.

Para a TNn, o Eta/HadGEM2-ES indica haver, de um modo geral, tendência de aumento de valores para o período atual e futuro, ainda que aumentos significativos tenham sido registrados,

sobretudo, para o cenário de emissão RCP 8.5. Para o RCP 4.5, apenas a TZE apresentou aumento significativo, com incremento de temperatura da ordem de 0.053/ano. Com relação ao Eta/MIROC5, não foram detectadas tendências significativas para aumento ou redução de temperatura, uma vez que Z variou entre -1.43 e +1.75.

O índice de extremo climático RX1day apresenta tendência de aumento significativo para a zona climática EQU no período atual e em ambos os cenários futuros do Eta/HadGEM2-ES, variando de 0,076 a 0,194 mm/ano de incremento. Para as zonas TEM e TBC, aumentos significativos foram detectados apenas para o RCP 4.5. Via de regra, ao nível de confiança de 95%, os aumentos generalizados não se mostraram significativos. A exceção esteve associada à zona TNO, no cenário RCP 8.5, para o qual foi verificada redução de valores de precipitação, com decréscimo de -0,263, porém não significativo ( $Z = -1.28$ ).

Quadro inverso foi observado para RX1day, em se considerando o Eta/MIROC5. De um modo geral, houve redução de precipitação, inclusive em níveis significativos, associado ao cenário de emissão RCP 8.5: o decréscimo variou de -0,468 ( $Z = -3,53$ ), para a TBC, a -0,243 ( $Z = -4.75$ ), para a EQU. Tendências de aumento, porém, foram detectadas, a despeito de não serem significativas, particularmente com relação ao período atual.

Tendência significativa de aumento da temperatura foi também observada, de forma generalizada, no Eta/HadGEM2-ES, com relação a índice Temp7dias. Nesse caso, tal resultado esteve associado, particularmente, ao período futuro, envolvendo os dois cenários de emissão. Para o RCP 4.5, Z variou de 3,14, para TNO, e 4,28, para TZE, com incrementos de temperatura da ordem de 0,066 a 0,067 °C/ano, respectivamente para TZE e TNO.

No RCP 8.5, o maior incremento esteve associado à zona TBC, com 0,071 °C/ano. No período atual, somente na zona TZE foi constatada tendência de aumento significativo de temperatura, com Z igual a 2,28, mas com incremento relativamente pequeno, da ordem de 0,029 °C/ano. Ainda no período atual, TEM e TBC apresentaram  $Z = 0$ , indicando a inexistência de tendência.

Com relação ao Eta/MIROC5, somente a zona TBC apresentou tendência significativa de aumento de temperatura, para ambos os cenários de emissão, com Z igual a 2,03, para o RCP 4.5, e 2,46, para o RCP 8.5. Entre as tendências remanescentes, destacam-se as de perfil de aumento não significativo, observadas no período atual e futuro, neste caso para ambos os cenários de emissão. Destaca-se a ausência de tendência no RCP 8.5 ( $Z = 0$ ), para a zona TEM.



#### 4.2.5. Identificação dos *hotspots*

- **Temperatura mínima**

Para o limite inferior do primeiro intervalo de temperatura mínima, considerando ambos os cenários de emissão (RCP 4.5 e RCP 8.5) dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, tem-se que:

- Limite mínimo do primeiro intervalo: -15 °C;
- Cálculo da temperatura mínima no pavimento, segundo o método SUPERPAVE:

$$T_{Min} = 0,859 * T_{MinAr} + 1,7$$

Considerando a temperatura mínima observada (-15 °C), tem-se que:

$$T_{Min} = 0,859 * T_{minAr} + 1,7 = 0,859 * (-15^{\circ}\text{C}) + 1,7 \rightarrow T_{Min} = - 11,2^{\circ}\text{C}.$$

No Brasil, os ligantes mais utilizados são o CAP 30/45 e o CAP 50/70 que, de acordo com Marques e Santos (2009), equivalem às seguintes classificações pelo método SUPERPAVE:

- CAP 30/45: PG 64-22 ou PG 70-16, conforme a refinaria;
- CAP 50/70: PG 58-16, PG 58-22, PG 64-16 ou PG 64-22, conforme a refinaria.

Dessa forma, verifica-se que a temperatura mínima a que os pavimentos podem resistir, no Brasil, situa-se entre -22 °C e -16 °C. Portanto, a temperatura mínima que os mesmos atingirão (-11,2 °C, na pior da hipótese) e muito superior àquelas para as quais foram projetados.

Assim, pode-se concluir que não há *hotspot* relacionado as temperaturas mínimas

- **Temperatura máxima**

Da equivalência apresentada anteriormente, pode-se dizer que os pavimentos no Brasil resistem às temperaturas máximas situadas entre 58 °C e 70 °C.

Existe grande dificuldade de reconhecimento da temperatura de projeto do pavimento, tendo em vista a dificuldade do cruzamento de dados e a múltipla equivalência da nomenclatura CAP brasileira em relação à nomenclatura PG norte-americana.

Portanto, em favor da segurança, será considerado que o pavimento no Brasil tem como resistência máxima o valor médio do intervalo das máximas admissíveis, isto é, a temperatura de 64 °C.

A temperatura de projeto equivale à temperatura no plano situado 20 mm abaixo da superfície do pavimento. A equação a seguir mostra como é calculada a temperatura máxima de projeto de um pavimento.

$$T_{Máx} = 32,7 + 0,837 * T_{MáxAr} - 0,0029 * Lat^2 + z * (\sigma^2 + \delta_{modelo}^2)^{0,5}$$

A partir de simples manipulação algébrica, conclui-se que:

$$T_{MáxAr} = \frac{T_{Máx} - 32,7 + 0,0029 * Lat^2 - z * (\sigma^2 + \delta_{modelo}^2)^{0,5}}{0,837}$$

De acordo com o método SUPERPAVE, é interessante adotar os valores de  $z = 2,055$  (98% de confiança),  $\delta = 2,1$  (erro do modelo),  $\sigma = 1,0$  °C.

Conforme mencionado anteriormente, o valor de  $T_{Máx}$  será de 64 °C. Para a latitude, serão considerados intervalos de 5°, adotando-se, para o cálculo da temperatura do *hotspot*, o valor médio de tal intervalo. É exceção o primeiro intervalo, o qual terá 10° de extensão, abrangendo de 5 °N a 5 °S.

Assim, são consideradas as TMax apresentadas no Quadro 14. Dentro das faixas de latitude assinaladas, será considerada um *hotspot* a região que apresentar temperatura média dos 7 dias consecutivos mais quentes do ano superior aos valores de  $T_{MáxAr}$  (°C).

**Quadro 14.** Temperatura máxima em conformidade com a latitude

Latitude	$T_{MáxAr}$ (°C)
5°N a 5°S	31,8
5° S a 10°S	31,9
10° S a 15°S	32,2
15° S a 20°S	32,7
20° S a 25°S	33,4
25° S a 30°S	34,3
30° S a 35°S	35,3

Fonte: Elaboração própria.

As Figuras 46 a 49 apresentam os *hotspots* considerados para a variável temperatura, segundo os modelos climáticos e respectivos cenários de emissão.

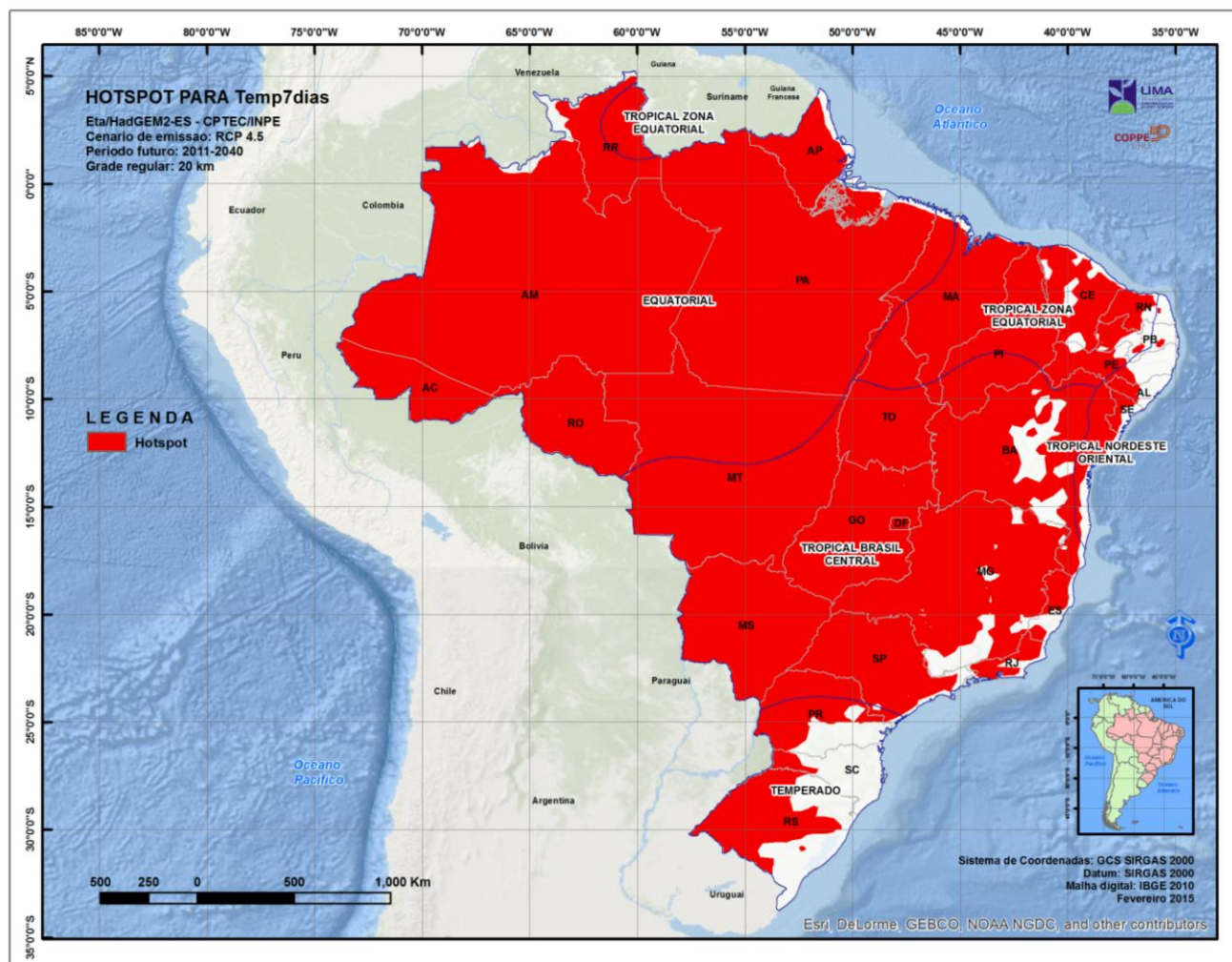


Figura 46. Hotspot para Temp7dias – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria

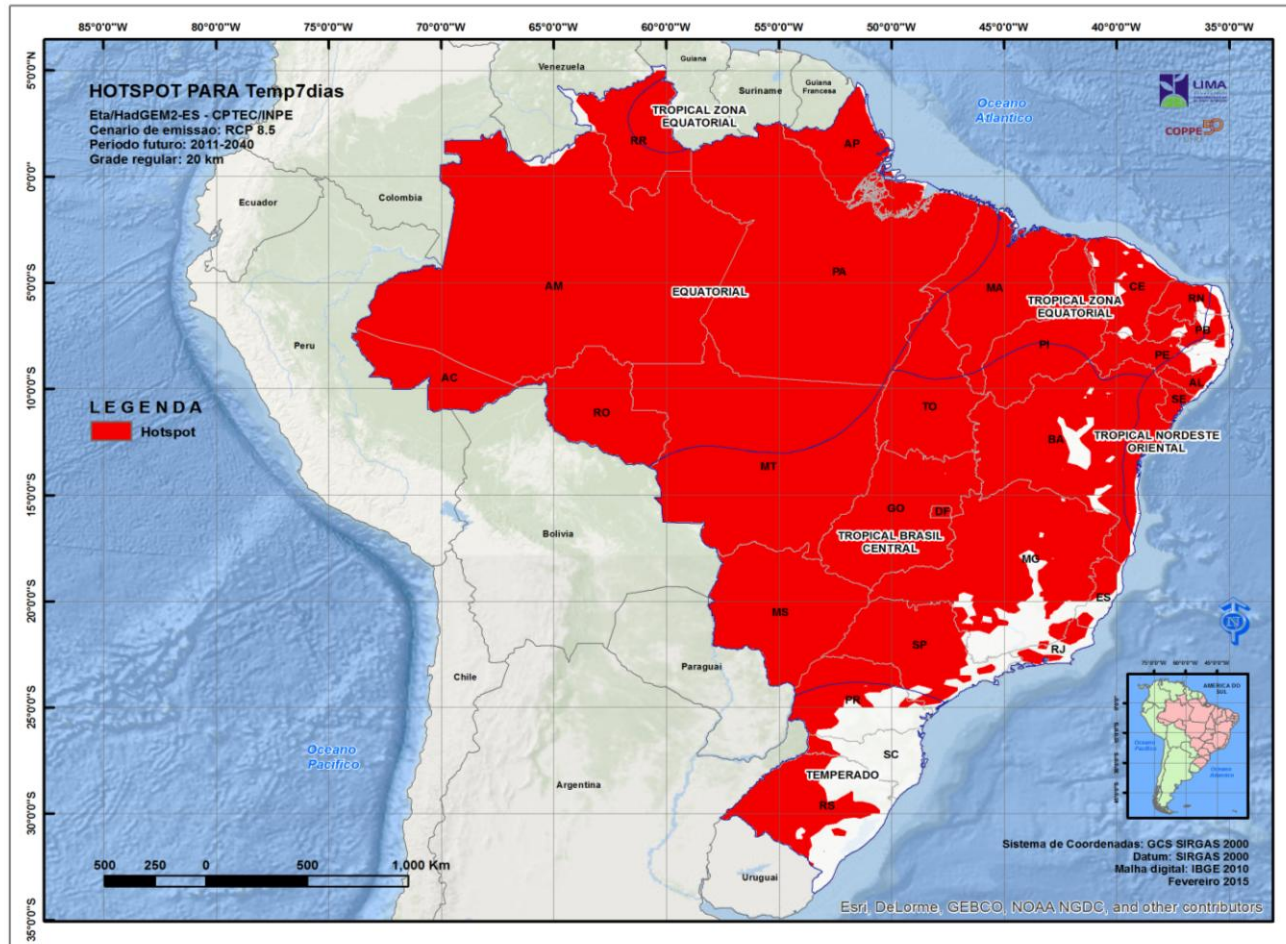
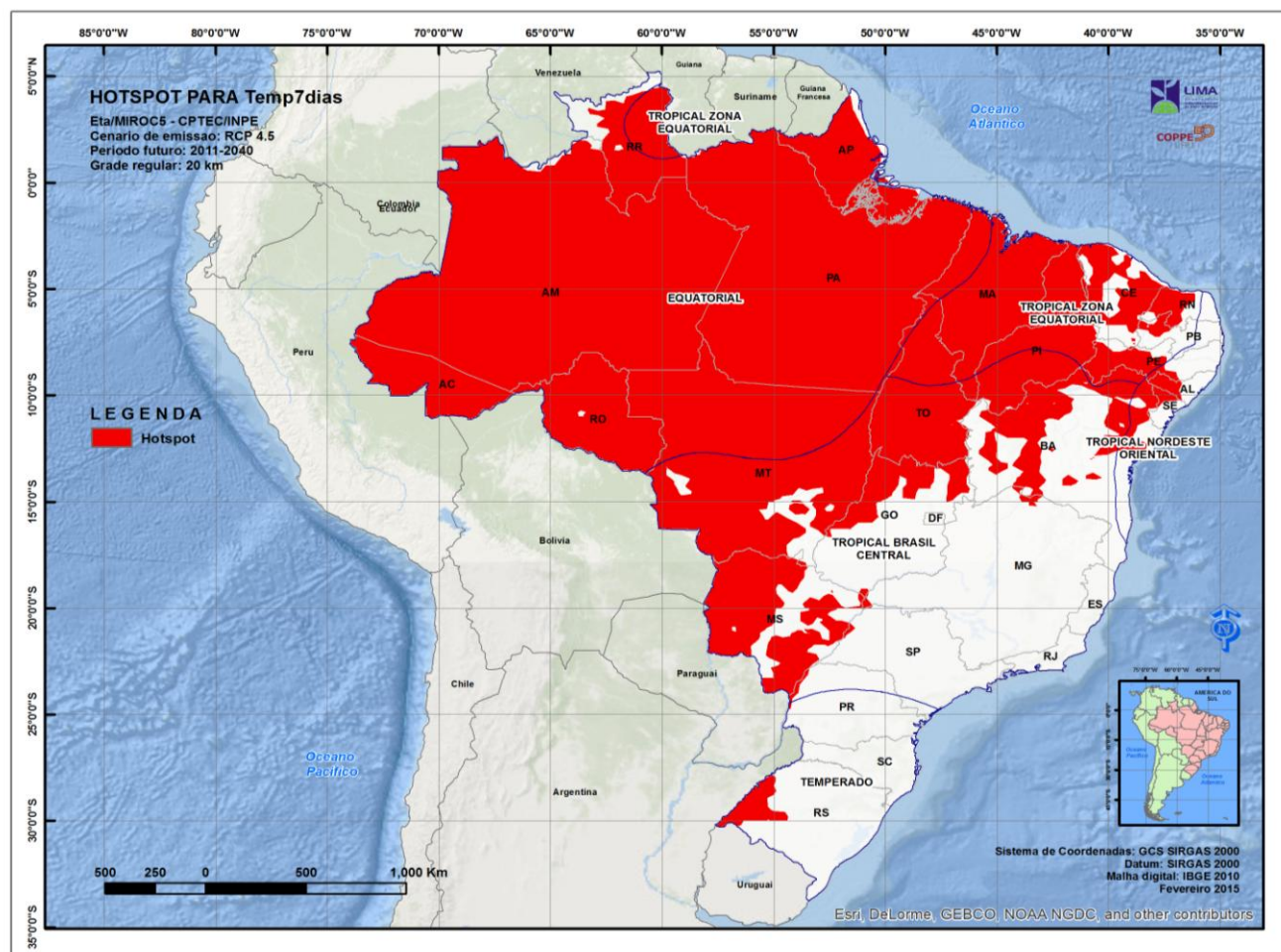


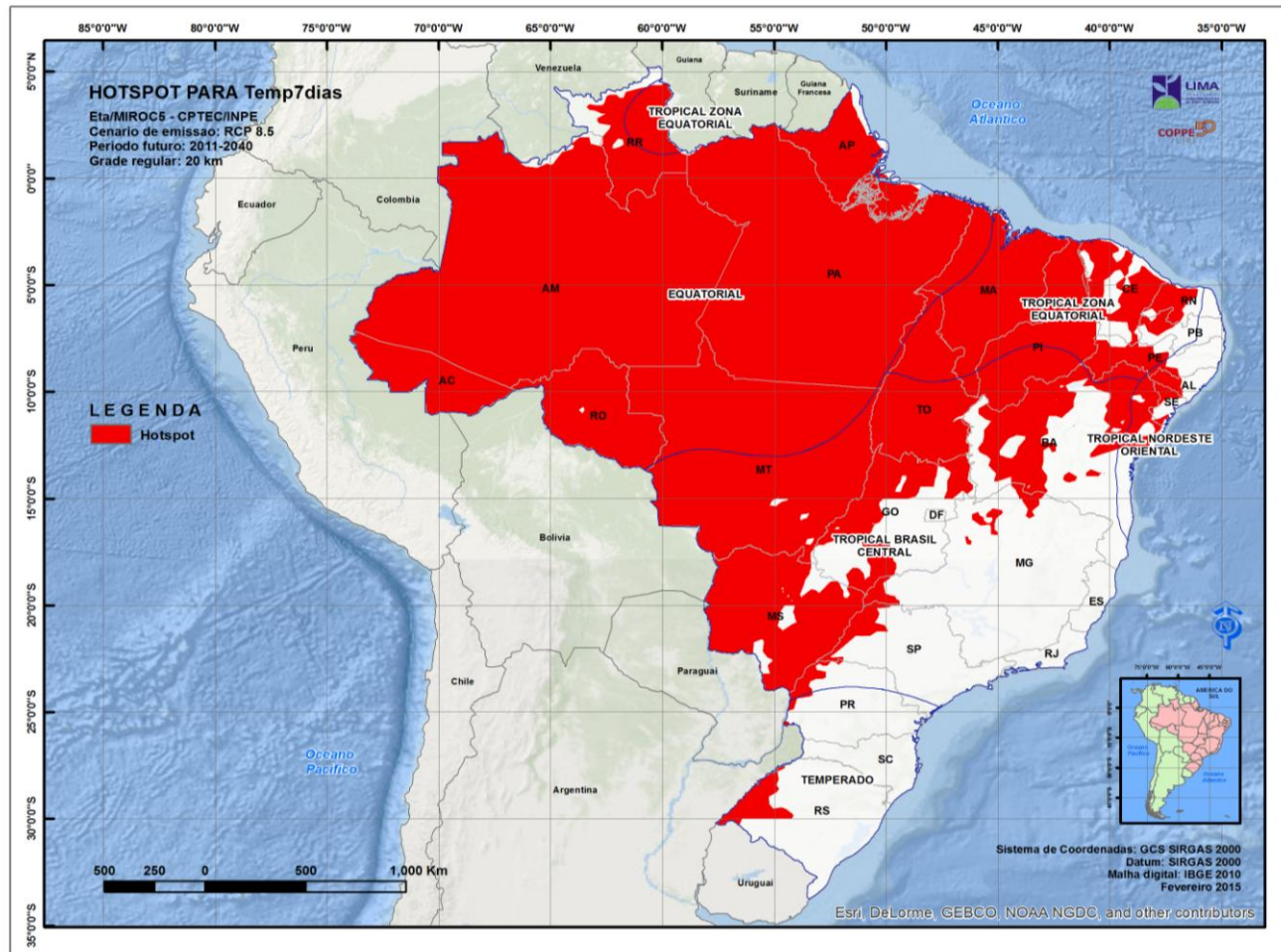
Figura 47. Hotspot para Temp7dias – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria



**Figura 48.** Hotspot para Temp7dias – Eta/MIROC5, RCP 4.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria



**Figura 49.** Hotspot para Temp7dias – Eta/MIROC5, RCP 8.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria

▪ **Precipitação máxima**

De posse dos dados disponíveis e dos coeficientes de desagregação propostos por DNAE/CETESB (1980), são formulados os intervalos de intensidades pluviométricas apresentados no Quadro 15.

**Quadro 15.** Intervalos de intensidades pluviométricas

Limites (A) (mm)	Intervalo (B) (Precipitação de 5min em mm: $A*0,42*0,34*0,74$ )	Intensidade pluviométrica (B*12) (mm/h)
0	0,0	0,0
15	1,6	19,0
30	3,2	38,0
45	4,8	57,1
60	6,3	76,1
75	7,9	95,1
90	9,5	114,1
105	11,1	133,1
120	12,7	152,2
135	14,3	171,2
150	15,9	190,2

Fonte: Elaboração própria.

Os intervalos de intensidade pluviométricas, em mm/h, devem ser comparados com os que foram utilizados no Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006), os quais foram levantados pelo Eng. Otto Pfafstetter, em seu clássico estudo intitulado “Chuvas Intensas no Brasil” (Pfafstetter, 1982). Tal estudo é referência não só para dimensionamento de dispositivos de drenagem, como para transposição de talvegues e para instalações prediais de águas pluviais.

Conforme mencionado anteriormente, os dados fornecidos pelo INPE fazem uma estimativa de parâmetros médios futuros. No entanto, no caso de dimensionamento de dispositivos para drenagem em projetos rodoviários, deve-se tomar como parâmetro o cenário adverso provocado por um evento extremo com tempo de recorrência adequado à importância do dispositivo. O Quadro 16 relaciona o tipo de drenagem com o tempo de recorrência da precipitação utilizada para dimensionar a estrutura necessária.



**Quadro 16.** Tempos de recorrência recomendados para obras de drenagem em rodovias federais.

Dispositivo de Drenagem		Tempo de Recorrência (anos)
Drenagem Superficial		5 a 10
Drenagem Subsuperficial		10
Bueiro Tubular	Como canal	15
	Como orifício	25
Bueiro Celular	Como canal	25
	Como orifício	50
Pontilhão		50
Ponte		100

Fonte: DNIT (IS-203).

Pela dificuldade em se prever a ocorrência de eventos extremos com tempos de recorrência elevados, adotou-se, para efeito de comparação, a previsão do valor da chuva máxima de 1 dia, variável RX1day, já abordada no presente texto. Tal previsão de chuva, em mm, foi transformada em intensidade pluviométrica (mm/h), de acordo com a metodologia de desagregação de dados, resumida no Quadro 15.

Em seguida, as estações descritas no estudo de Pfafstetter foram dispostas no terreno (Figura 50) e, assim, considerou-se como previsão de intensidade pluviométrica o limite superior da classe em que a estação se situa. Tal valor foi comparado com a intensidade pluviométrica calculada por Pfafstetter para o tempo de recorrência de 5 anos, mínimo utilizado em dimensionamento de estruturas de drenagem.

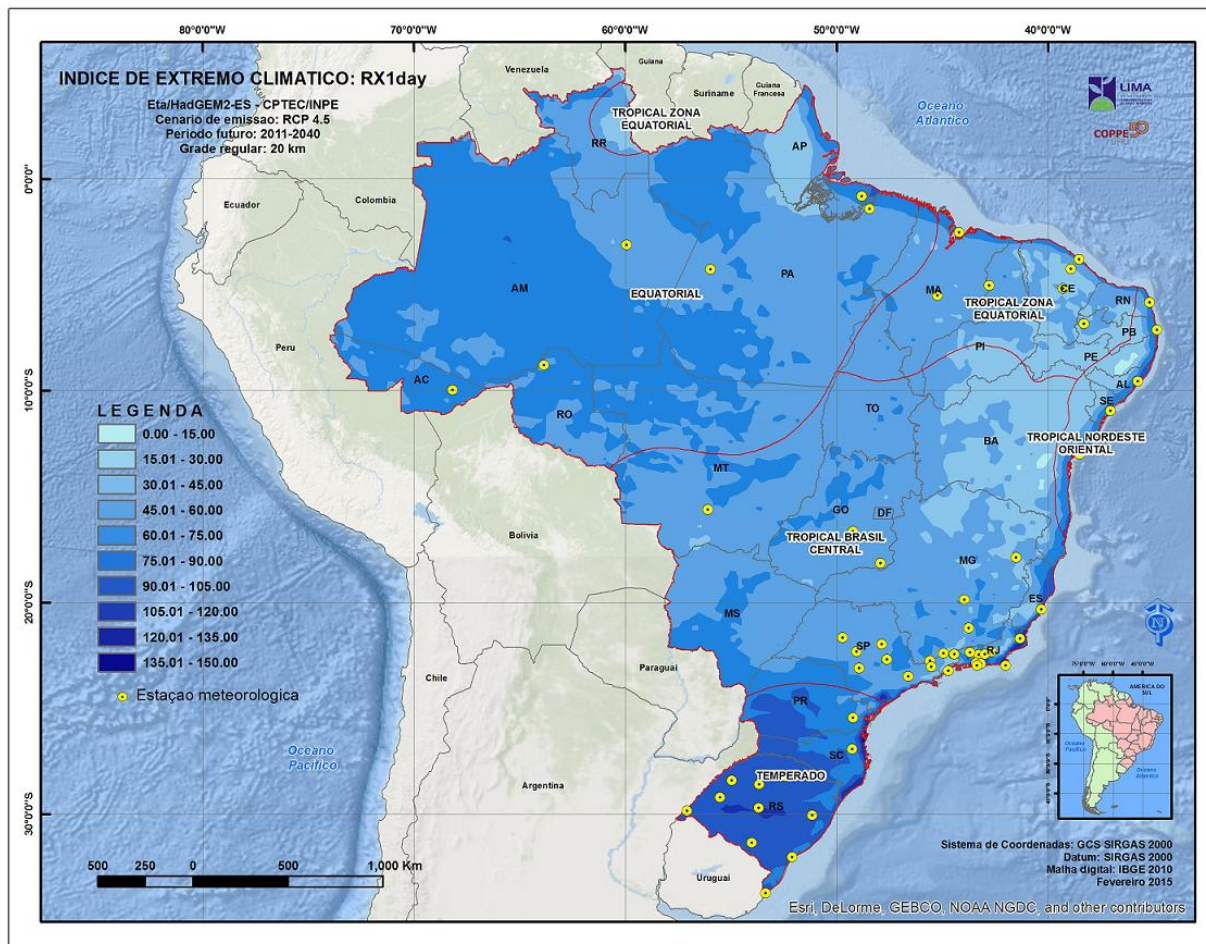


Figura 50. Estações pluviométricas analisadas por Pfafstetter (1982)

Fonte: Elaboração própria

O Quadro 17 exibe a referida comparação para os dois modelos climáticos (Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5), para os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5. Assim, foi considerado *hotspot* a região de inserção da estação climática cuja intensidade pluviométrica, para qualquer cenário e modelo climático, tenha sido maior do que 80% do previsto no modelo de Pfafstetter.

**Quadro 17.** Intensidade pluviométrica (em mm) projetada e estimadas por Pfafstetter (1982), para chuvas com tempo de recorrência de 5 anos.

Estação Pluviométrica	Projeção de intensidade pluviométrica (mm/h)				Intensidade de projeto com 5 anos de recorrência (mm/h)
	HG 4.5	HG 8.5	MR 4.5	MR 8.5	
Alegrete/RS	95	95	57	76	238
Alto Itatiaia/RJ	76	76	95	95	164
Alto Tapajós/PA	57	76	57	57	229
Alto Teresópolis/RJ	76	76	95	95	137
<b>Aracaju/SE</b>	57	<b>114</b>	<b>152</b>	<b>152</b>	<b>122</b>
Avaré/SP	57	76	95	76	144
Bagé/RS	95	95	57	57	204
Barbacena/MG	57	57	57	57	222
Barra do Corda/MA	57	57	57	57	128
Bauru/SP	57	76	95	76	120
Belém/PA	57	57	57	57	157
Belo Horizonte/MG	76	57	76	95	227
Blumenau/SC	76	76	76	57	125
<b>Cabo Frio/RJ</b>	<b>114</b>	<b>114</b>	<b>133</b>	<b>114</b>	<b>146</b>
Campos/RJ	114	114	133	133	206
Campos do Jordão/SP	57	57	57	57	144
Catalão/GO	57	57	76	76	174
Cruz Alta/RS	95	114	76	76	246
Cuiabá/MT	57	57	76	57	190
Curitiba/PR	76	76	76	57	204
Fortaleza/CE	38	57	57	57	156
Goiânia/GO	57	57	57	57	178
Guaramiranga/CE	57	57	38	57	126
<b>João Pessoa/PB</b>	76	95	<b>114</b>	<b>133</b>	<b>140</b>
Lins/SP	57	57	95	76	122
<b>Maceió/AL</b>	<b>114</b>	<b>114</b>	<b>152</b>	<b>152</b>	<b>122</b>
Manaus/AM	57	57	57	57	180

Estação Pluviométrica	Projeção de intensidade pluviométrica (mm/h)				Intensidade de projeto com 5 anos de recorrência (mm/h)
	HG 4.5	HG 8.5	MR 4.5	MR 8.5	
Natal/RN	76	95	95	95	120
Nova Friburgo/RJ	38	76	95	95	124
Passa Quatro/MG	76	57	76	57	180
Passo Fundo/RS	95	95	76	76	125
Petrópolis/RJ	76	76	95	95	126
Piracicaba/SP	76	76	95	76	122
Porto Alegre/RS	95	95	57	57	146
Porto Velho/RO	38	76	76	57	167
Quixeramobim/CE	76	57	57	57	121
Resende/RJ	76	76	95	95	203
Rio Branco/AC	38	76	76	76	139
Rio de Janeiro/RJ (Bangu)	57	114	114	114	156
Rio de Janeiro/RJ (Ipanema)	57	114	114	114	125
Rio de Janeiro /RJ (Jacarepaguá)	57	114	114	114	142
Rio Grande/RS	76	95	76	76	204
Salvador/BA	57	95	152	152	122
Santa Maria/RS	133	95	76	76	122
Santa Vitória do Palmar/RS	95	95	76	76	126
São Carlos/SP	57	76	95	76	178
São Gonçalo/PB	57	57	57	57	124
São Luiz/MA	76	76	57	57	126
São Luiz Gonzaga/RS	95	95	76	76	209
São Paulo/SP (Congonhas)	57	57	76	76	132
Soure/PA	76	76	57	57	162
Taubaté/SP	57	57	76	76	172
Teófilo Otoni/MG	57	57	76	76	121
Teresina/PI	57	57	57	57	240
Teresópolis/RJ	76	76	95	95	149
Ubatuba/SP	57	57	57	57	149
Uruguaiana/RS	95	95	57	57	142
Vassouras/RJ	76	76	95	95	179
Vitória/ES	95	114	152	152	156

**Legenda:** HG: Eta/HadGEM2-ES; MR: Eta/MIROC5

Obs.: As estações que determinam os *hotspots* para precipitação estão assinalados em vermelho

Fonte: Elaboração própria

Assim sendo, pode-se perceber a existência de duas áreas críticas descontínuas. A primeira delas é constituída pela faixa litorânea que se estende do Rio Grande do Norte ao Rio de Janeiro, facilmente visualizada no modelo Eta/MIROC5, no cenário de emissão RCP 8.5. O segundo *hotspot* se situa no Rio Grande do Sul, e diz respeito a estação pluviométrica da cidade de Santa Maria, que está associado ao cenário de emissão RCP 4.5, do modelo Eta/HadGEM2-ES.

As Figuras 51 a 54 apresenta os *hotspots* para a precipitação.

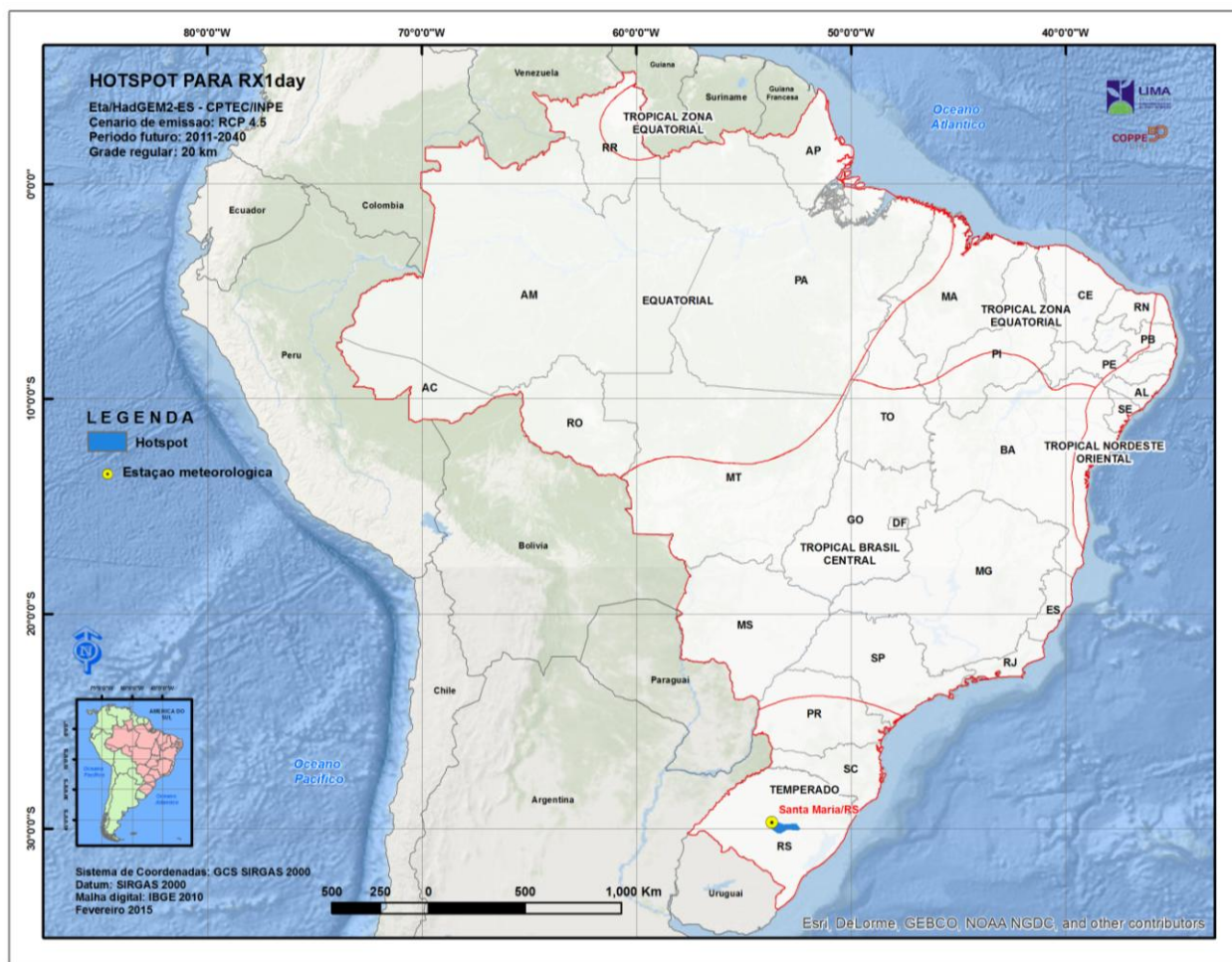


Figura 51. Hotspot para RX1day – Eta/HadGEM2-ES, RCP 4.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria

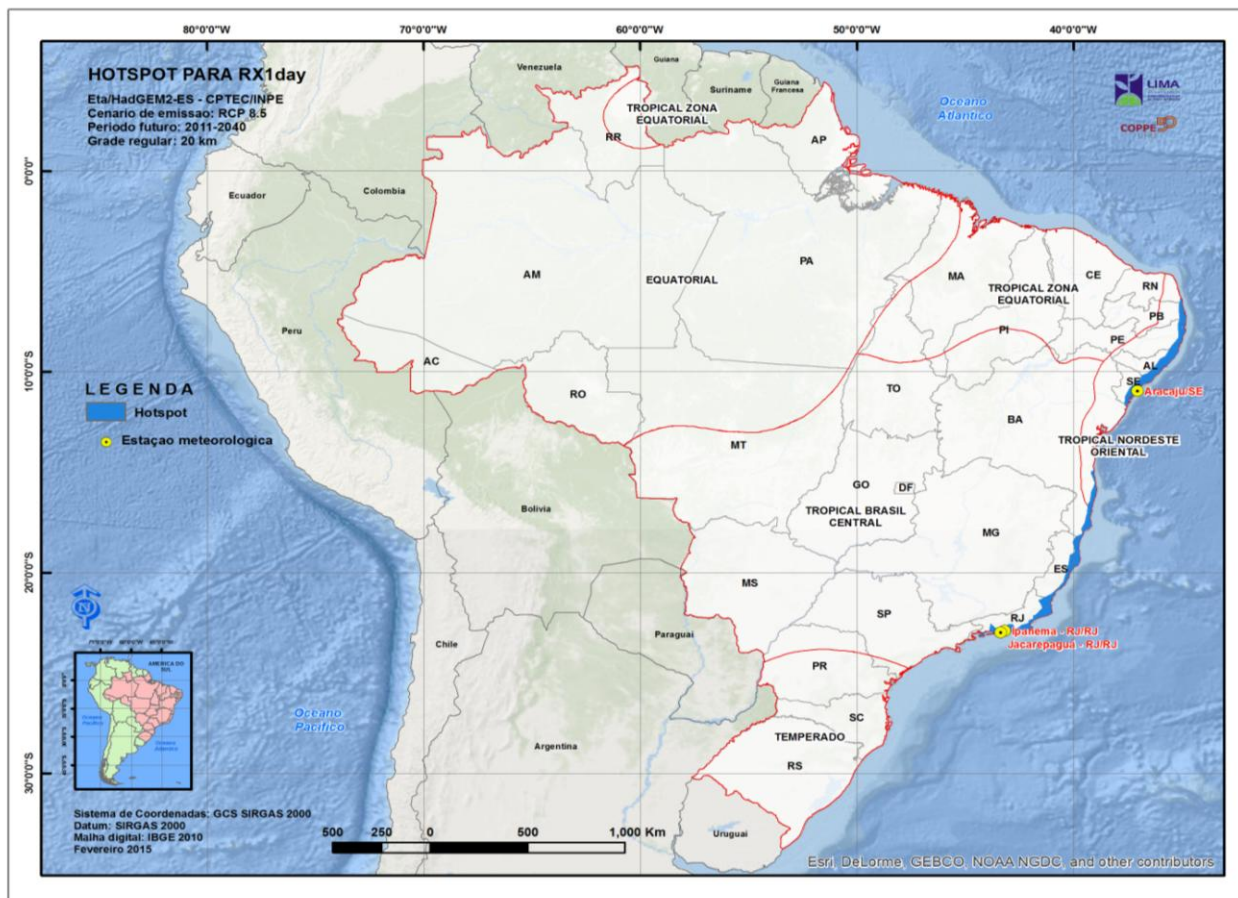
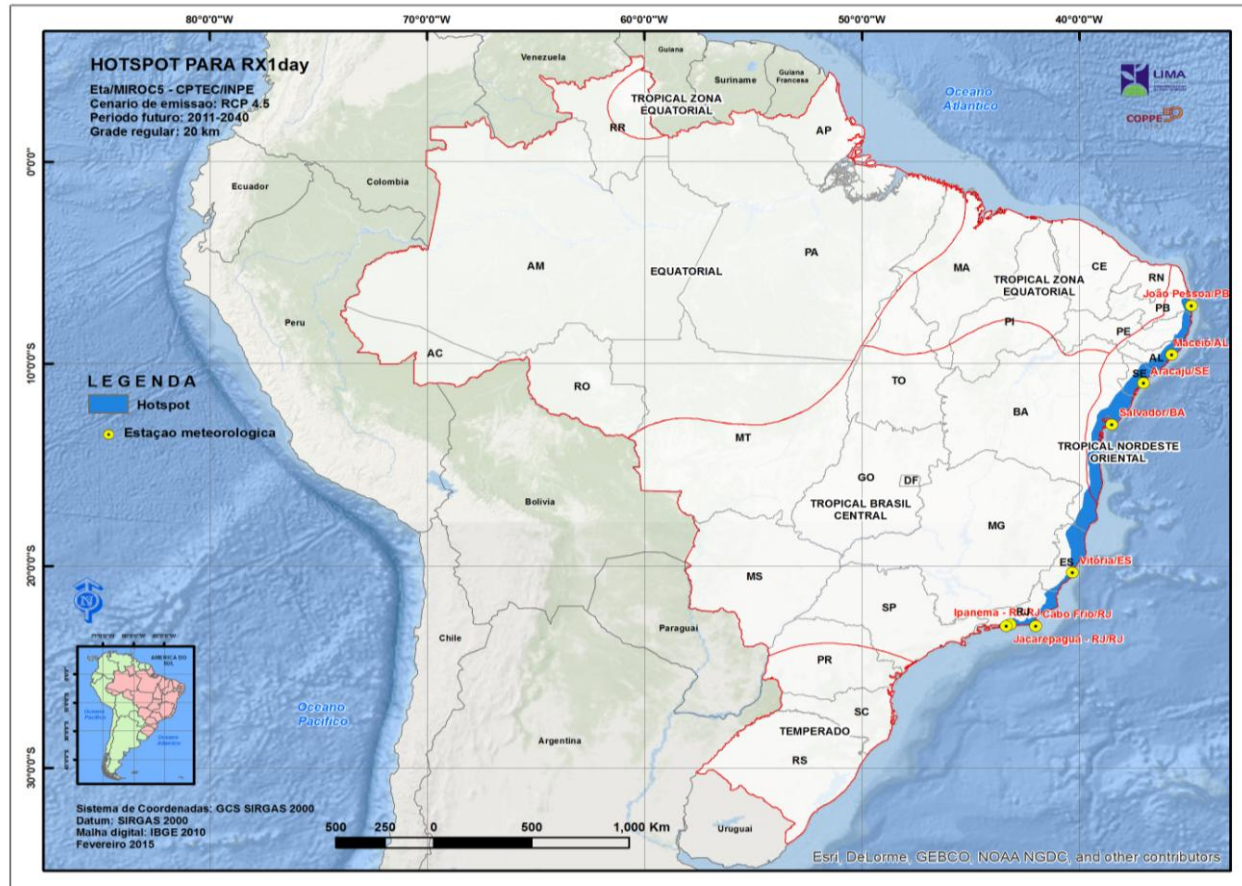


Figura 52. Hotspot para RX1day – Eta/HadGEM2-ES, RCP 8.5. Período futuro: 2011-2040

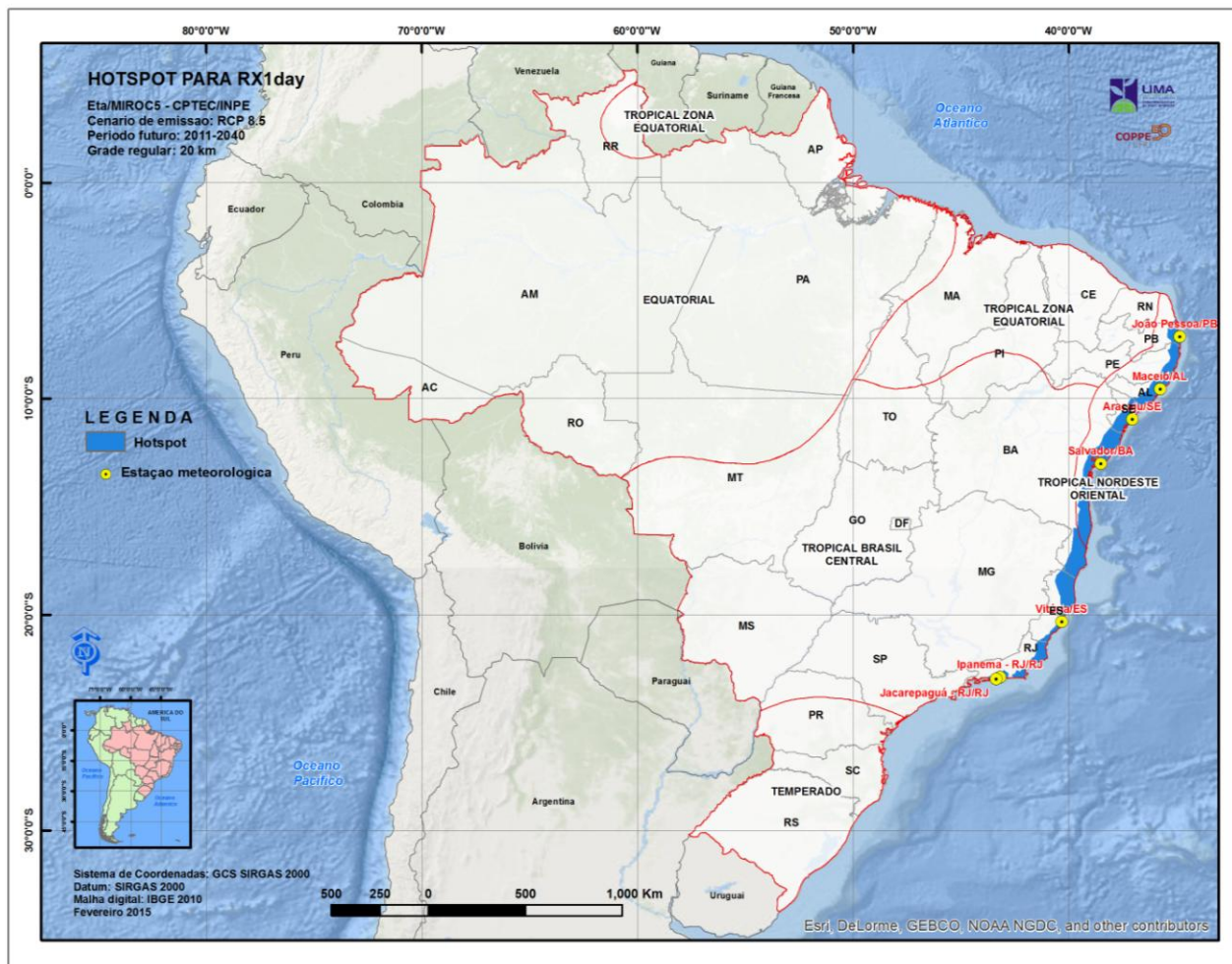
Fonte: Elaboração própria



**Figura 53.** Hotspot para RX1day – Eta/MIROC5, RCP 4.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria



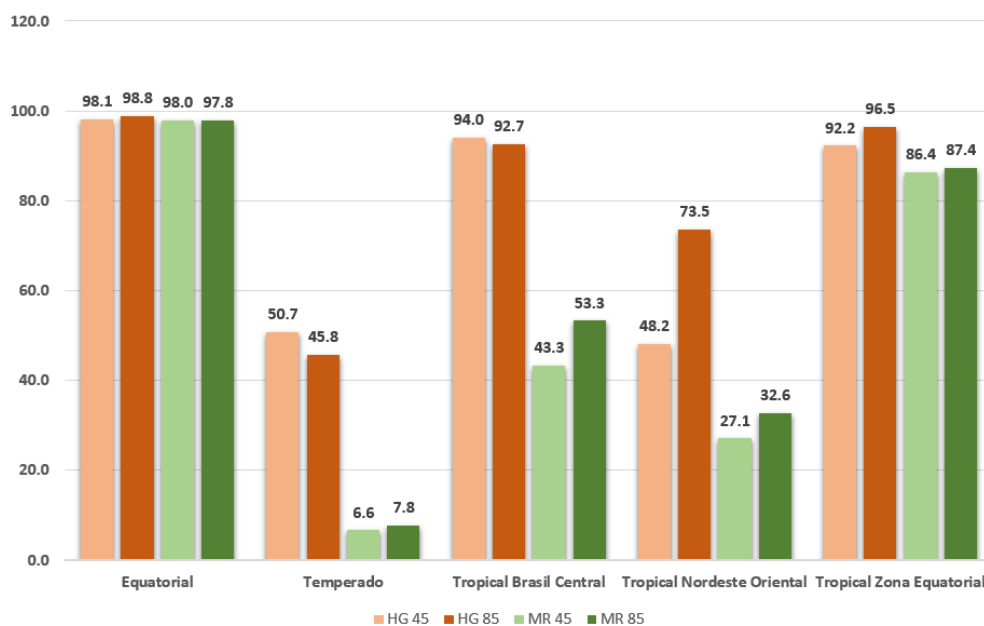


**Figura 54.** Hotspot para RX1day – Eta/MIROC5, RCP 8.5. Período futuro: 2011-2040

Fonte: Elaboração própria

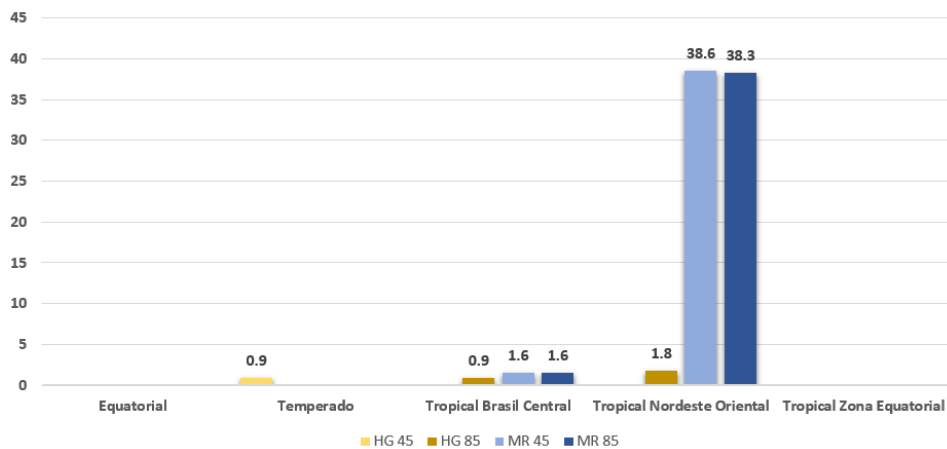
### 4.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As Figuras 55 a 57 apresentam os resultados obtidos para os *hotspots* climáticos de temperatura (Temp7dias) e precipitação (RX1day). A síntese dos dados está disponível no Quadro 18.



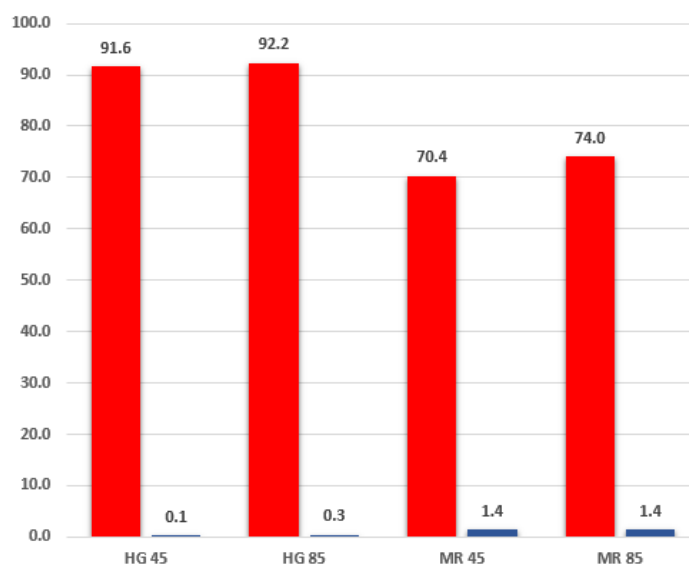
**Figura 55.** Percentuais de *hotspots* de Temp7dias por zona climática, para os modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES (HG) e Eta/MIROC5 (MR) e cenários de emissão RCP 4.5 e 8.5

**Fonte:** Elaboração própria



**Figura 56.** Percentuais de *hotspot* de RX1day por zona climática, para os modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES (HG) e Eta/MIROC5 (MR) e cenários de emissão RCP 4.5 e 8.5

Fonte: Elaboração própria



**Figura 57.** Percentuais dos *hotspots* de Temp7dias e RX1day com relação a área total do Brasil, para os modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES (HG) e Eta/MIROC5 (MR) e cenários de emissão RCP 4.5 e 8.5

Fonte: Elaboração própria

**Quadro 18.** Síntese dos dados dos *hotspots* de Temp7dias e RX1day, por zona climática, para os modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES (HG) e Eta/MIROC5b (MR), cenários de emissão RCP 4.5 e 8.5

Zona climática	Área total ZC (km <sup>2</sup> )	HG 45		HG 85		MR 45		MR 85	
		Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%
<b>Temperatura (Temp7dias)</b>									
Equatorial	3974037.53	3899284.78	98.1	3928132.59	98.8	3893049.67	98.0	3886693.85	97.8
Temperada	523115.21	265315.64	50.7	239512.14	45.8	34666.41	6.6	40775.58	7.8
Tropical Brasil Central	2919953.92	2744020.07	94.0	2705406.82	92.7	1264721.66	43.3	1556182.71	53.3
Tropical Nordeste Oriental	197998.19	95390.64	48.2	145545.79	73.5	53580.81	27.1	64614.11	32.6
Tropical Zona Equatorial	864137.62	797045.47	92.2	834064.19	96.5	746951.42	86.4	754844.80	87.4
<b>Total da área da ZC em hotspot</b>		7801056.60		7852661.53		5992969.97		6303111.05	
<b>Área da ZC em hotspot/Área Brasil</b>		91.6		92.2		70.4		74.0	
<b>Precipitação (RX1day)</b>									
Equatorial	3974037.53	---	---	---	---	---	---	---	---
Temperada	523115.21	4879.10	0.9	---	---	---	---	---	---
Tropical Brasil Central	2919953.92	---	---	26053.50	0.9	45432.15	1.6	45314.77	1.6
Tropical Nordeste Oriental	197998.19	---	---	3563.32	1.8	76377.24	38.6	75845.58	38.3
Tropical Zona Equatorial	864137.62	---	---	---	---	---	---	---	---
<b>Total da área da ZC em hotspot</b>		4879.10		29616.82		121809.39		121160.35	
<b>Área da ZC em hotspot/Área Brasil</b>		0.1		0.3		1.4		1.4	

Fonte: Elaboração própria

### **Temperatura – Temp7dias**

As zonas Equatorial e Tropical Equatorial apresentam elevado percentual de área no hotspot climático de temperatura, acima de 97% e 86%, respectivamente. Os modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, para os dois cenários de emissão, estão bem representados nessas zonas climáticas, portanto. Na Zona Equatorial, as áreas fora do hotspot são o norte e noroeste de Roraima, norte e nordeste do Amapá e o litoral dos estados do Para e Maranhão.

Na Zona Tropical Brasil Central, a área abrangida pelo hotspot foi superior a 92%, para ambos os cenários do Eta/HadGEM2-ES. Para o Eta/MIROC5, porém, a área ocupada foi de 43,3%, no RCP 4.5, e 53,3%, no RCP 8.5.

Com relação à Zona Tropical Equatorial, foi verificado um certo equilíbrio entre os percentuais de ambos os cenários dos dois modelos climáticos, com o Eta/HadGEM2-ES apresentando percentuais ligeiramente superiores ao Eta/MIROC5 - 92,2% e 96,5%, para o RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente, para o primeiro, contra 86,4% e 87,4%, para os mesmos cenários, do Eta/MIROC5.

Na Zona Tropical Nordeste Oriental, o Eta/HadGEM2-ES sobrepujou o Eta/MIROC5 em área inserida no hotspot, variando de 48,2%, no RCP 4.5, e 73,5%, no RCP 8.5. Para o Eta/MIROC5, os percentuais foram 27,1, no RCP 4.5, e 32,6, no RCP 8.5.

Para a Zona Temperada, o hotspot climático definido pelo modelo Eta/HadGEM2-ES uma vez mais foi o mais extenso, ainda que em valores inferiores aos registrados nas demais zonas climáticas. Nesse caso, os resultados obtidos apontam para um percentual de 50,7% e 45,8%, respectivamente para os cenários de maior e menor emissão. Para o Eta/MIROC5, da mesma forma, os percentuais foram os menores comparativamente as demais zonas climáticas: 6,6%, para o RCP 4.5, e 7,8%, para o RCP 8.5.

Assim, o hotspot relativo a Temp7dias apresenta uma ampla distribuição pelo território nacional, considerando os dois modelos e cenários de emissão avaliados. Via de regra, porém, o modelo Eta/HadGEM2-ES apresentou maior participação relativa na definição do hotspot para as cinco zonas climáticas, comparativamente ao Eta/MIROC5. Com relação aos cenários climáticos, o RCP 4.5 superou o RCP 8.5 em apenas duas ocasiões, ainda que com margem relativamente pequena. Tal situação foi verificada para as zonas Temperada e Tropical Brasil Central. Para o Eta/MIROC5, o cenário RCP 8.5 foi o que participou regularmente para a definição de um maior

hotspot climático, a exceção da Zona Equatorial, onde, por uma margem de diferença insignificante (0,2%), o RCP 4.5 foi maior.

Considerando a área de hotspot por zona climática com relação a extensão do território nacional, relativamente aos cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5, do modelo Eta/HadGEM2-ES, verificou-se um elevado percentual de abrangência, sendo da ordem de 91,6 e 92,2%, respectivamente. Significativo, porém menor que o modelo anterior, os percentuais para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, do modelo Eta/MIROC5, foram 70,4 e 74,0%, respectivamente.

Cumprir assinalar que tendência significativa de incremento de temperatura ao nível de 95% de confiança foi constatada para a zona Equatorial, Tropical Nordeste Oriental e Tropical Equatorial, o cenário de emissão RCP 4.5, do modelo climático Eta/HadGEM2-ES. Incrementos significativos foram também assinalados para o RCP 8,5, particularmente para as zonas climáticas Equatorial, Tropical Brasil Central e Tropical Equatorial. Com relação ao Eta/MIROC5, tendência de incremento significativo de temperatura foi assinalada apenas para a zona climática Tropical Brasil Central, para ambos os cenários de emissão.

### **Precipitação – RX1day**

Com relação à precipitação, não foi verificado *hotspot* para as zonas climáticas Equatorial e Tropical Equatorial. Para a Zona Temperada, constatou-se apenas uma pequena área na região de inserção da estação meteorológica de Santa Maria/RS, não superior a 5 mil km<sup>2</sup> (cerca de 1% do território da referida zona climática), no RCP 8.5, do Eta/HadGEM2-ES.

A Zona Tropical Brasil Central também apresenta uma pequena área de hotspot climático, não superior a 1% da área da mesma (cerca de 26 mil km<sup>2</sup>), a qual está relacionada ao cenário RCP 8.5, do modelo Eta/HadGEM2-ES. Trata-se de uma área contínua junto ao litoral, entre o sul da Bahia e a região de inserção das estações meteorológicas de Ipanema e Jacarepaguá, na Cidade do Rio de Janeiro, no Estado de mesmo nome. Para o mesmo cenário e modelo, verificou-se uma segunda faixa de hotspot junto ao litoral inserida na Zona Tropical Nordeste Oriental, entre o sul do Estado do Rio Grande do Norte e o sul de Sergipe, correspondente a 1,8% da referida zona (cerca de 3,5 mil km<sup>2</sup>).

Hotspots também foram obtidos para ambos os cenários do Eta/MIROC5, os quais, assim como para o cenário RCP 8.5, do Eta/HadGEM2-ES, situam-se junto ao litoral. Com relação a Zona Tropical Brasil Central, a faixa de hotspot estende-se desde o sul do Rio Grande do Norte até o sul

da Bahia e, a partir dessa região, já na Zona Tropical Brasil Central, até a altura da Cidade do Rio de Janeiro, no Estado de mesmo nome. Esta longa faixa possui cerca de 121 mil km<sup>2</sup>, sendo que cerca de 76 mil km<sup>2</sup> estão na Zona Tropical Brasil Central (1,6% da área) e, aproximadamente 45 mil km<sup>2</sup>, na Zona Tropical Nordeste Oriental (38,6% da área).

Reside, portanto, na Zona Tropical Nordeste Oriental, a maior extensão do hotspot para o RX1day, para ambos os RCP, do modelo Eta/MIROC5.

Considerando a área de hotspot por zona climática com relação a extensão do território nacional, relativamente aos cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5, dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, verificou-se um baixo percentual de abrangência, sendo da ordem de 0,1, 0,3, 1,4 e 1,4%, respectivamente.

Vale ressaltar que tendência significativa de elevação para RX1day foi constatada para as zonas Equatorial, Temperada e Tropical Brasil Central, para o RCP 4.5, mas apenas para a Zona Equatorial, sob as projeções associadas ao RCP 8.5, com relação ao modelo Eta/HadGEM2-ES. Para o Eta/MIROC5, porém, as projeções apontam para decréscimo significativo de precipitação no RCP 4.5, para a Zona Equatorial, e igualmente para o RCP 8.5, com relação as zonas Equatorial, Tropical Brasil Central e Tropical Equatorial.

## ANEXO I - ESTUDOS REALIZADOS NO CAMPO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SISTEMA DE TRANSPORTE

O quadro a seguir apresenta o resumo de outros estudos realizados no campo das mudanças climáticas e sistema de transporte, e que serviram também como referência para o desenvolvimento deste trabalho. Para tal, foram extraídas as informações das variáveis climáticas, os indicadores relacionados e os possíveis impactos nos modais estudados.

Região	Estudo	Modal	Variável	Indicador	Efeitos/Impactos/Consequências
Austrália (Melbourne)	Keay & Simmons, 2006; 2005	Rodovias	Precipitação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 mm, após 1-5 dias de seca</li> <li>• 10 mm, após mais de 5 dias de seca</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento de 5% no risco de acidentes de carro comparativamente a dias úmidos não em intervalos (<i>not in spell</i>)</li> <li>• Aumento de 30% no risco de acidentes de carro comparativamente a dias úmidos não em intervalos (<i>not in spell</i>)</li> </ul>
Canadá	Andrey <i>et al.</i> , 2003	Rodovias	Temperatura	• Nevasca forte; $\geq 3$ cm em 6 horas	• Risco de colisão aumentado em 2.42
	Mills & Andrey, 2002	Rodovias	Temperatura	• Temperatura diária = 0 °C	• O aumento da frequência de ciclos de congelamento ( <i>freeze-thaw</i> ) resulta na deterioração prematura do pavimento de estradas
		Rodovias	Precipitação	• > 25 mm	• Enchentes afetam a infraestrutura rodoviária, fundação de pontes
	Rowland <i>et al.</i> , 2007	Rodovias	Temperatura	• $T \geq 26$ °C; $T \geq 25$ °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento da taxa de colisão de carros.</li> <li>• Fadiga de motoristas de ônibus/caminhões</li> </ul>
Europa	VTT, 2011	Rodovias	Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\geq 25</math> °C</li> <li>• <math>\geq 32</math> °C; <math>\geq 43</math> °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possível aumento na taxa de colisão registrada para o transporte rodoviário, em consequência e fadiga de motoristas de ônibus e caminhões.</li> <li>• Taxa de acidentes aumentada, atrasos, desvios. Danos ao pavimento (<i>rutting, softening, derretimento do asfalto</i>). Restrições nas ações de manutenção e construção.</li> </ul>
			Precipitação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\geq 50</math> mm/24 h</li> <li>• <math>\geq 100</math> mm/24 h</li> <li>• <math>\geq 150</math> mm/24 h</li> <li>• <math>\geq 100</math> mm/48 h</li> <li>• <math>\geq 150</math> mm/48 h</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Danos a estradas secundárias não pavimentadas. Aumento do risco de colisão em estradas. Estradas alagadas, redução do atrito com o pavimento.</li> <li>• Taxa de acidentes aumentada. Bueiros entupidos. Retorno da água pelo sistema de drenagem. Passagens subterrâneas inundadas. Tampas de bueiros desalojadas podem causar problemas. Redução da visibilidade.</li> <li>• Tráfego interrompido. Taxa de acidentes aumentada. Atrasos. Danos a estradas. Estradas não pavimentadas podem ser severamente</li> </ul>



Região	Estudo	Modal	Variável	Indicador	Efeitos/Impactos/Consequências
		Rodovias/outros modais			<p>danificadas. A estrutura de estradas pode colapsar. Pontes podem ser afogadas, assim como carros podem ser cobertos pela água. Estradas obstruídas por debrís e lama</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reconstrução. Atrasos no tráfego. Deslizamentos de terra, erosão. Danos a pontes.</li> <li>• Estradas fechadas entre 1 e 6 dias. Passagens subterrâneas afogadas. Atrasos no tráfego.</li> </ul>
			Temperatura (neve)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\geq 1</math> cm/24 h</li> <li>• <math>\geq 10</math> cm/24 h</li> <li>• <math>\geq 20</math> cm/24 h</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ligeiro aumento na taxa de acidentes em estradas. Em situações extremas (e.g., abaixo de <math>-10</math> °C), a neve derretida pode formar uma camada que favorece derrapagens.</li> <li>• Aumento do risco de acidentes nas estradas. Atrasos em viagens e fechamento de estradas. As estradas tornam-se escorregadias, sob condições de baixas temperaturas e ventos.</li> <li>• Tráfego conturbado, engarrafado. Elevada taxa de acidentes. Estradas fechadas temporariamente. Estradas escorregadias e com bancos de neves.</li> </ul>
			Precipitação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\leq 0</math> °C</li> <li>• <math>\leq -7</math> °C</li> <li>• <math>\leq -20</math> °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento do risco de acidentes nas estradas. Deterioração prematura do pavimento de estradas.</li> <li>• Aumento do risco de acidentes nas estradas. Atrasos em viagens e fechamento de estradas. Neve compactada pelos próprios automóveis podem tornar as pistas escorregadias.</li> <li>• Transporte público pode sofrer paradas em função da performance de combustíveis. Limitação à circulação de pessoas.</li> </ul>
			Rajada de Vento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\geq 17</math> m/s</li> <li>• <math>\geq 25</math> m/s</li> <li>• <math>\geq 32</math> m/s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problemas localizados em trechos particulares, em função da queda de árvores sobre estradas e carros.</li> <li>• Corte de energia por períodos prolongados. Atrasos e interrupção de tráfego, em decorrência da queda de muitas árvores, baixa visibilidade e presença de neve, poeira ou debrís nas pistas.</li> <li>• Grandes danos materiais. Corte de energia generalizado e prolongado, em função da queda de muitas árvores. Tráfego pode entrar em colapso.</li> </ul>
			Nevasca	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Queda de neve <math>\geq 10</math> cm/24 h, rajadas de vento <math>\geq 17</math> m/s e temperatura média diária <math>\leq 0</math> °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxa de acidentes aumentada em 2 a 4 vezes. Atrasos e interrupções em todos os modais de transporte.</li> </ul>
Estônia	Komulainen, 1994	Rodovias	Ventos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 29 m/s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Morte de 850 pessoas</li> </ul>

Região	Estudo	Modal	Variável	Indicador	Efeitos/Impactos/Consequências
Finlândia	Juga & Hipi, 2009	Rodovias	Temperatura – Ventos	• Neve densa (abaixo de -5 °C) associado a ventos fortes (> 20 km/h)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Congelamento do sistema de arrefecimento dos carros.</li> <li>• Engavetamento de carros</li> </ul>
	Rauhala <i>et al.</i> , 2009	Rodovias	Granizo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\geq 1.5</math> (cm) / longa duração</li> <li>• 2-3</li> <li>• 3-5</li> <li>• <math>\geq 7</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rodovias escorregadias, visibilidade reduzida</li> <li>• Dano ocasional à estrutura metálica de carros</li> <li>• Dano ocasional à estrutura metálica de carros e vidros quebrados</li> <li>• Danos pesados à estrutura metálica de carros (mossas) e vidros completamente quebrados</li> </ul>
	Rauhala & Juga, 2010	Rodovias	Ventos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 15 m/s</li> <li>• 17 m/s</li> <li>• 20 m/s</li> <li>• 28 m/s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Queda de algumas árvores</li> <li>• Queda de árvores sobre carros, estradas, linhas de transmissão de energia e telefone, equipamentos de iluminação e de tráfego</li> <li>• Queda de muitas árvores. Corte de energia por longos períodos (interrupção de sistemas de comunicação e iluminação). Sinalização vertical pode ser afetada negativamente.</li> <li>• Corte de energia por longos períodos e extensas áreas</li> </ul>
	Rauhala & Mantyniemi, 2010, <i>apud</i> Leviakangas, 2011	Rodovias	Ventos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 33 m/s</li> <li>• 50 m/s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Queda de muitas árvores, que podem obstruir trechos extensos de rodovias e tombar sobre carros. Carros podem ser arrastados para fora das rodovias.</li> <li>• Queda de energia.</li> <li>• Queda de muitas árvores, que podem obstruir trechos extensos de rodovias. Pessoas presas em trechos de rodovias e impedidas de deixarem suas residências.</li> </ul>
	Precipitação		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 100 mm</li> <li>• 140 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas de escoamento entopem e transbordam. Passagens subterrâneas obstruídas. Tampa de bueiros podem ser deslocadas e interferir no trânsito de veículos.</li> <li>• Estruturas das estradas podem colapsar. Estradas de chão podem ser severamente afetadas. Afogamento de automóveis em trechos mais baixos de rodovias.</li> </ul>	
Mundo	ETCCDMI sitio de internet, Alexander <i>et al.</i> , 2005; Tank & Konnen, 2003; Kiktev, 2009; Tank <i>et al.</i> , 2009	Rodovias	Precipitação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RR <math>\geq 10</math> mm. Número de dias de Precipitação intensa</li> <li>• RR <math>\geq 20</math> mm. Número de dias de Precipitação intensa</li> <li>• RR 95%. Dias muito úmidos. Percentagem anual de dias com chuvas intensas (acima do</li> </ul>	XXXXXX

Região	Estudo	Modal	Variável	Indicador	Efeitos/Impactos/Consequências
				<ul style="list-style-type: none"> <li>percentil 95 da distribuição de dias de Precipitação referente ao período 1961-1990</li> <li>• RR 99%. Dias muito úmidos. Percentagem anual de dias com chuvas intensas (acima do percentil 95 da distribuição de dias de Precipitação referente ao período 1961-1991</li> <li>• RR 5 dias. Maior grupo de 5 dias de chuva em um ano</li> <li>• T<sub>min</sub> &lt; 10%. Índice de "cold spell" (CSDI): Contagem anual de dias com, pelo menos, 6 dias consecutivos quando T mínimo diário &lt; 10th percentil</li> <li>• T<sub>max</sub> &gt; 25 °C. Número de dias de verão (contagem anual)</li> <li>• T<sub>min</sub> &gt; 20 °C. Número de noites tropicais (contagem anual)</li> <li>• T<sub>max</sub> &gt; 90%. Índice de duração de período de calor (WSDI): contagem anual de dias com, pelo menos, 6 dias consecutivos quando T Máximo diário &gt; 90th percentil</li> <li>• T<sub>min</sub> &lt; 0 °C. Número de "frost days" (contagem anual)</li> <li>• T<sub>max</sub> &lt; 0 °C. Número de "icing days" (contagem anual)</li> </ul>	
Suécia	Norman <i>et al.</i> , 2000	Rodovias	Temperatura – Ventos	• Neve densa associado a ventos fortes (> 20 km/h)	• O mais elevado nível de risco de acidente de carros.
USA	Ashley & Black, 2008	Rodovias	Ventos	• > 63 km/h	• Queda de árvores, colisão de veículos com arvores caídas e nuvens de poeira com registros de mortes
	Eisenberg & Warner, 2004	Rodovias	Precipitação	• 6 dias secos >; > 21 dias secos	• 17,9% de aumento no risco de colisão em estradas comparada com dias úmidos <i>not in spells</i> .
				• > 21 dias secos	• 23,1% de aumento no risco de colisão em estradas comparada com dias úmidos <i>not in spells</i> .
Goodwin, 2003	Rodovias	Ventos	• Acima de 63 km/h	• Obstrução de pistas. Aumento do tempo de viagem. Fechamento de estradas. Acesso a veículos apenas autorizados	

Região	Estudo	Modal	Variável	Indicador	Efeitos/Impactos/Consequências
USA (Chicago, St. Louis)			Neblina	• Visibilidade abaixo de 53.3 m	• Fechamento de rodovias em autopistas ( <i>road closure on highways</i> )
		Rodovias (Tennessee)	Neblina	• Visibilidade abaixo de 73.2 m	• Fechamento de rodovias em autopistas ( <i>road closure on highways</i> )
	<b>Knapp et al., 2000</b>	Rodovias	Temperatura – Ventos	• Queda de neve $\geq 0,5$ cm/h por mais de 4 horas	• Redução do volume de tráfego na ordem de 29%. Taxa de acidentes cresceu significativamente.
	<b>National Research Council, 2008</b>	Rodovias	Precipitação	• Chuvas fortes, • > 25 mm	• Erosão na base da estrada, e sustentação de pontes. Redução do vão sob pontes. Sobrecarga de sistemas de drenagem, lâmina d'água no asfalto, danos a camada de suporte, afetando a integridade de estradas, pontes e tuneis.
			Temperatura	• T = 29.5; = 40.5; = 32.0; = 43 °C	• Expansão térmica das juntas de dilatação e asfalto. Restrições em ações de manutenção. Comprometimento da integridade do asfalto.
	<b>Peterson et al., 2006, apud Leviakangas, 2011</b>	Rodovias (Região Oeste)	Temperatura	• Temp maior ou igual a 28,9 °C por mais de uma hora associado a ventos acima de 10 mph	• Limite perigoso para ventos congelantes
		Rodovias (America Norte)	Temperatura	• T = 29,5 °C; T $\geq 32$ °C; T $\geq 43$ °C	• Restrições na construção e manutenção de rodovias
		Rodovias (USA)	Temperatura	• Tmin $\leq 0$ °C nas próximas 12-36 h	• <i>Freezing warning issue</i>
		Rodovias	Ventos	• 38, 80 e 97 km/h	• Risco para o setor de transporte de superfície. • Risco moderado para o trânsito de veículos.
		Rodovias (Chicago)	Precipitação	• 25.5 mm	• Danos a pontes e estradas
	<b>Pisano et al, 2002</b>	Rodovias	Ventos	• 39 nós	• Ventos fortes bloqueiam pontes temporariamente. Redução da visibilidade pelo lançamento de neve ou poeira sobre as estradas
			Precipitação	• Chuvas fortes, > 25 mm	• Muito baixa visibilidade, submersão de pistas, passagens subterrâneas alagadas, danos a <i>roadbeds</i>
			Neblina	• < 800 m; < 400 m	• Baixa visibilidade. Aumento do risco de colisão em cadeia
<b>Tackle, 1990</b>	Rodovias	Temperatura	• Ts < 0; Ts < Td; Td ~ 0 ou >> Ts	• Congelamento em pontes e rodovias acarreta considerável danos a veículos, estruturas e arvores, assim como incidentes e acidentes com vítimas fatais devido à perda de controle dos veículos.	
<b>USA (Chicago, St. Louis)</b>	<b>Palecki et al., 2001</b>	Rodovias	Temperatura	• Índice de calor $\geq 38$ °C por várias horas	• Derretimento do asfalto, podendo levar ao fechamento de estradas

Fonte: Elaboração própria

## ANEXO II - CLIMATOLOGIA ATUAL DO BRASIL

O Brasil apresenta grande diversidade de domínios climáticos que variam do equatorial ao subtropical, com gradações de tipos e subtipos determinados pela variabilidade geocológica existente no país. Devido a grande extensão territorial, há diversificados regimes de precipitação e temperatura, com distintas características regionais.

### ▪ Região Norte

Na Região Norte, predomina o clima equatorial chuvoso, caracterizado pela ausência de estação seca nitidamente demarcada e pelo maior total pluviométrico anual do Brasil (Quadro *et al.*, 1996).

Dentre os principais sistemas que atuam na região, está a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a penetração de sistemas frontais, o deslocamento da Alta Subtropical do Atlântico Sul/Alta Subtropical do Atlântico Norte (ASAS/ASAN) e a Alta da Bolívia, que podem interagir, ainda, com fenômenos climáticos de escala global, como o El Niño e La Niña (Quadro *et al.*, 1996).

A região apresenta homogeneidade espacial e sazonal no que diz respeito à temperatura, cuja média é de 25 °C. Durante o inverno, toda a zona meridional, particularmente no sudoeste, é invadida com frequência por anticiclones originários de altas latitudes, sendo que os muito intensos provocam o fenômeno da friagem (Nimer, 1979). Em virtude da alta umidade relativa e intensa nebulosidade, não são registradas temperaturas máximas diárias excessivas durante o ano (Marengo & Nobre, 2009).

A pluviosidade, ao contrário, apresenta significativa heterogeneidade espacial e sazonal, e média de 2.500 mm/ano (Marengo & Nobre, 2009). Chuvas acima de 3.000 mm ocorrem no noroeste do Amazonas, na parte centro-sul da região, entre o Amazonas e o Pará, em torno da latitude 5° S e entre o Pará e o Amapá. Próximas à Belém, as precipitações anuais superam os 4.000 mm, influenciadas pelas linhas de instabilidade que se formam ao longo da costa.

A estação chuvosa típica ocorre de dezembro a fevereiro, mas muda, progressivamente, para janeiro-março, ao sul, e para abril-junho, a noroeste, o que se deve ao deslocamento da ZCIT, cujos núcleos de precipitação migram da parte central do país, no verão austral, para o setor noroeste da América do Sul, no inverno austral (Rao & Hada, 1990).

#### ▪ Região Nordeste

Na Região Nordeste, de modo geral, a temperatura apresenta elevada homogeneidade sazonal e espacial, com exceção do sul Bahia, onde há penetração de massas relativamente frias nos meses de inverno. A quase totalidade da região se localiza em baixa latitude (entre 5 e 10 °S), o que confere temperaturas com mínimas acima de 15 °C e máximas que podem atingir 40 °C. Segundo Nimer (1979), as temperaturas médias anuais são sempre superiores a 24 °C, podendo ultrapassar 26 °C, como se verifica na depressão do São Francisco. A pouca variação de médias mensais e anuais confere amplitudes térmicas de 3 a 5 °C, menores, portanto, que nas demais regiões intertropicais.

Com relação à precipitação, observa-se grande variedade climática. Na região semiárida, na parte central (clima tropical semiárido), a precipitação acumulada é inferior a 500 mm/ano, ao passo que, no litoral (clima litorâneo úmido), a precipitação anual supera 1.500 mm (Kousky & Chu, 1978). Ao norte, são registrados volumes de 1.000 a 1.200 mm/ano (clima tropical) (Hastenrath & Heller, 1977). Na Chapada Diamantina (BA), na parte oeste da Paraíba e no centro-norte de Pernambuco a precipitação pode atingir a 1500 mm, pela presença de serras e montanhas (Moura *et al.*, 2007).

A variabilidade sazonal e interanual da distribuição das chuvas é marcante, de modo que a região experimenta consequências severas por secas e precipitações intensas (UFSC, 2013). Nesse particular, o regime de precipitação resulta da interação entre relevo, posição geográfica e sistemas de pressão atuantes na região, bem como por fenômenos climáticos de larga escala, como a ZCIT, os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) e os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM). Tais fenômenos atmosféricos, por seu turno, são influenciados pelo El Niño-Oscilação Sul (ENOS), ventos alísios e pela temperatura e pressão da superfície do mar (Kayano *et al.* 2009).

A estação chuvosa, que concentra cerca de 60% da chuva anual, ocorre de março a maio, no norte, e de dezembro a fevereiro, no sul e sudeste, ao passo que, a leste, concentra-se entre maio e julho. A estação seca, via de regra, ocorre de setembro a dezembro (Rao *et al.*, 1993 ou 1990).

Anomalias na posição e intensidade da ZCIT, causadas por anomalias positivas na temperatura da superfície do Atlântico Sul (Moura & Shukla, 1981; Nobre, 1994) e pela ocorrência do El Niño, no Pacífico Equatorial são responsáveis pelas variações interanuais das chuvas, especialmente no leste da região.

#### ▪ Região Centro-Oeste

Na Região Centro-Oeste, via de regra, as temperaturas são elevadas, o verão é chuvoso e o inverno é seco. Nas áreas mais altas de Goiás e sul do Mato Grosso do Sul, porém, as temperaturas são moderadas e os verões, quentes e chuvosos. No norte do Mato Grosso, as temperaturas e os índices pluviométricos são elevados (Alves, 2009).

Forte aquecimento convectivo, em especial nos meses de verão, afeta, diretamente, a precipitação e a temperatura (Virji, 1981). Um dos fenômenos atmosféricos de grande relevância são os sistemas sinóticos provenientes do sul do País. Tais sistemas atuam principalmente no inverno, sendo responsáveis por condições de tempo moderado (Fernandes & Satyamurty, 1994).

Quadro *et al.* (1996) destacam a ocorrência de marcante variabilidade espacial e temporal de temperaturas e chuvas, o que se deve à diversidade do relevo e ao fato da região estar situada na zona de transição entre os climas quentes, de latitudes baixas, e os mesotérmicos do tipo temperado, de latitudes altas. Desta forma, as temperaturas são mais quentes nas áreas mais baixas e mais frias nas áreas mais altas, como nas chapadas de Goiás e Mato Grosso (Alves, 2009).

Vórtices ciclônicos em altos níveis, oriundos do Pacífico, e linhas de instabilidade pré-frontais são responsáveis por intensa precipitação (Cavalcanti *et al.*, 1982). A sazonalidade da precipitação é marcante, com invernos excessivamente secos e verões chuvosos. A precipitação anual média é de 1.500 mm, podendo superar 1.800 mm, no norte de Mato Grosso, pela influência dos sistemas amazônicos (Alves, 2009).

#### ▪ Regiões Sudeste

Nimer (1979) destaca que o Sudeste se insere no domínio de transição entre os climas quentes, de latitudes baixas, e os mesotérmicos de tipo temperado, das latitudes médias, sendo ainda marcada pela transição entre os regimes permanentemente úmidos, do Brasil Meridional e alternadamente secos e úmidos, do Brasil Central.

A maior diversidade de regimes climáticos observada, em comparação com as demais regiões do País, deve-se à variabilidade latitudinal e de relevo, a maritimidade/continentalidade e a atuação de sistemas tropicais e extratropicais de latitudes médias. Devido a esses mesmos fatores é comum observar variações importantes de temperaturas em locais relativamente próximos (Nunes *et al.*, 2009). Durante os meses de maior atividade convectiva, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) influencia o regime de chuvas que, semi-estacionárias, por dias seguidos, favorece a ocorrência de inundações (Quadro & Abreu, 1994).

As temperaturas mais baixas são verificadas nas áreas montanhosas entre São Paulo e Minas Gerais e a Serra de Paranapiacaba, cujas médias variam entre 14 e 18 °C e onde é comum a ocorrência de geadas. Apesar de raras, precipitações de neve podem ocorrer nas áreas mais altas de Campos do Jordão (SP) e Itatiaia (RJ). No outro extremo, oeste São Paulo, norte de Minas Gerais e praticamente todo o litoral da região experimentam temperatura média de 23 °C. Em posição intermediária, encontram-se as áreas centrais de São Paulo e Minas Gerais, cujas médias variam entre 19 e 21 °C, sendo comum, porém, a ocorrência de temperaturas abaixo de 0 °C, particularmente no inverno (UFSC, 2013).

A precipitação varia ao extremo na Região Sudeste. No litoral paulista, as médias superam 2.000 mm, podendo chegar a 4.500 mm, em Bertioga (Nunes et al., 2009). No outro extremo, totais pluviométricos anuais inferiores a 1.000 mm ocorrem no extremo norte do Espírito Santo e noroeste de Minas Gerais. Nas demais regiões, os totais pluviométricos anuais variam entre 1.250 e 1.700 mm.

#### ▪ Região Sul

A Região Sul é marcada pela transição entre climas quentes, de baixas latitudes, e mesotérmicos, de latitudes médias (Nimer, 1979). Tal fato, aliado à variabilidade latitudinal e de relevo, a maritimidade/continentalidade e atuação de variados sistemas tropicais e extratropicais de latitudes médias, acentua o contraste dos regimes de temperatura e precipitação (Grim, 2009). Por conseguinte, a região é frequentemente afetada por alagamentos, inundações, bruscas e graduais, escorregamentos, estiagens, vendavais, tornados, nevoeiros e ressacas (UFSC, 2013).

O clima da Região Sul é ditado por alguns fenômenos atmosféricos, a exemplo dos sistemas frontais, responsáveis por grande parte dos totais pluviométricos (Oliveira, 1986), e cuja trajetória está intimamente ligada ao posicionamento e intensidade do jato subtropical da América do Sul (Kousky & Cavalcanti, 1984). Grandes totais de precipitação que se abatem na região são consequência, também, de sistemas convectivos de mesoescala (Custódio & Herdies, 1994).

Outros fenômenos atmosféricos de importância estratégica para a ocorrência de índices significativos de precipitação são os vórtices ciclônicos de ar frio (Matsumoto et al., 1982; Silva Dias & Hallak, 1994), assim como frontogêneses e ciclogêneses, sendo estes últimos registrados, em média, cerca de 60 vezes a cada ano (Gan & Rao, 1991). Anomalias de precipitação podem ainda estar associadas a eventos de escala global, como o fenômeno ENSO (GRIM, 2009).



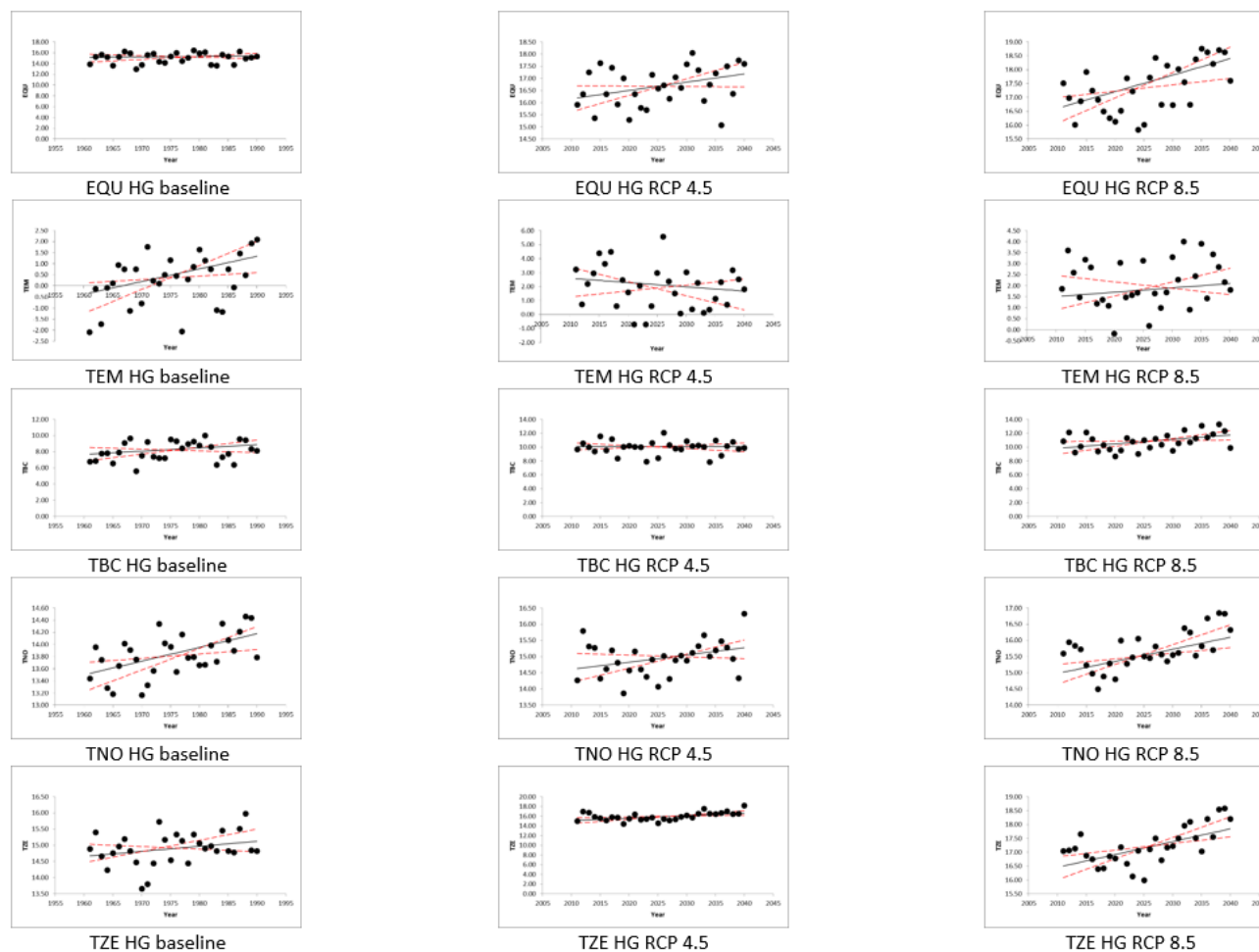
A distribuição das chuvas na Região Sul é bastante uniforme, variando entre 1.250 e 2.000 mm/ano. Chuvas acima de 2.000 mm/ano ocorrem no litoral do Paraná, no oeste de Santa Catarina e na região serrana do Rio Grande do Sul, ao passo que valores inferiores a 1.250 mm são verificados no litoral sul de Santa Catarina e norte do Paraná (Nimer, 1979).

A temperatura é relativamente uniforme, muito embora seja esta a região onde ocorrem as maiores amplitudes do ciclo anual de temperatura e as maiores variações da radiação solar, recebida entre o verão e inverno (Grim, 2009).

Temperaturas abaixo de 0 °C ocasionam a formação de geadas, um dos principais fenômenos atmosféricos regionais, bem como a precipitação de neve, entre maio e setembro, quando a massa de ar polar marítima (mP) é mais intensa. As áreas mais propensas a este fenômeno natural estão distribuídas no planalto serrano de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, em altitudes superiores a 600 m (UFSC, 2013).



### ANEXO III – ANÁLISE DE TENDÊNCIA ANUAL PARA OS EXTREMOS CLIMÁTICOS TNn, RX1day e Temp7dias

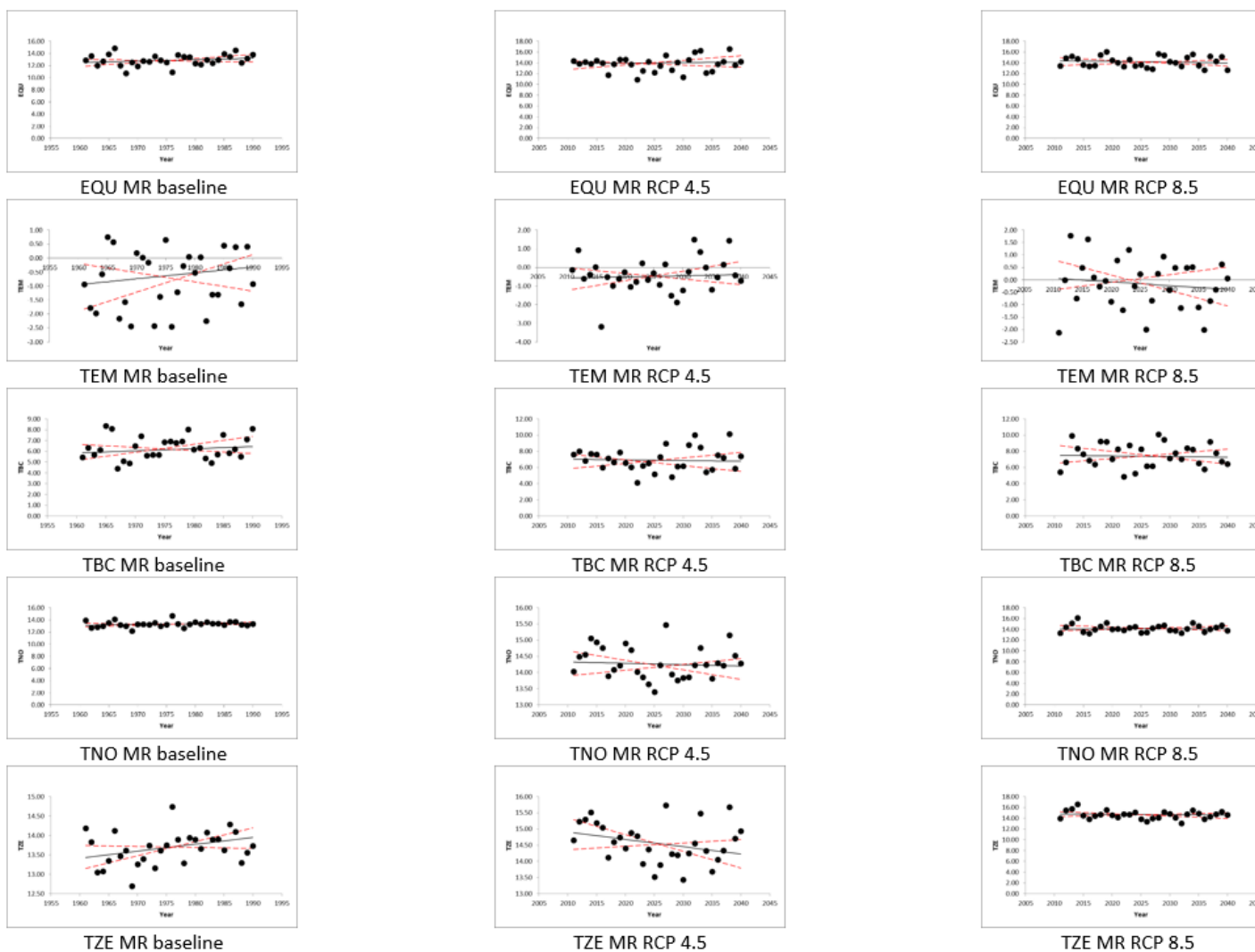


**Figura AIII.1** Gráficos de tendência anual para TNn, usando estimativa de Sen, para o Eta/HadGEM2-ES, por zona climática. Fonte: Elaboração própria

**Quadro AIII.1.** Tendência anual para TNn, usando estimativa de Sen, para o Eta/HadGEM2-ES, por zona climática

Zona climática	Primeiro ano	Último ano	n	Teste Z	Significância	Q	Tendência (para 95% de confiança)
<b>Baseline</b>							
EQU	1961	1990	30	0.57	#	0.008	TnSA
TEM	1961	1990	30	2.46	*	0.057	TSA
TBC	1961	1990	30	1.28	#	0.040	TnSA
TNO	1961	1990	30	2.93	**	0.023	TSA
TZE	1961	1990	30	1.21	#	0.016	TnSA
<b>RCP 4.5</b>							
EQU	2011	2040	30	1.89	+	0.034	TnSA
TEM	2011	2040	30	-0.96	#	-0.031	TnSR
TBC	2011	2040	30	0.04	#	0.001	TnSA
TNO	2011	2040	30	1.57	#	0.022	TnSA
TZE	2011	2040	30	2.64	**	0.053	TSA
<b>RCP 8.5</b>							
EQU	2011	2040	30	2.93	**	0.060	TSA
TEM	2011	2040	30	0.71	#	0.020	TnSA
TBC	2011	2040	30	2.18	*	0.065	TSA
TNO	2011	2040	30	3.07	**	0.037	TSA
TZE	2011	2040	30	3.50	***	0.046	TSA

Fonte: Elaboração própria

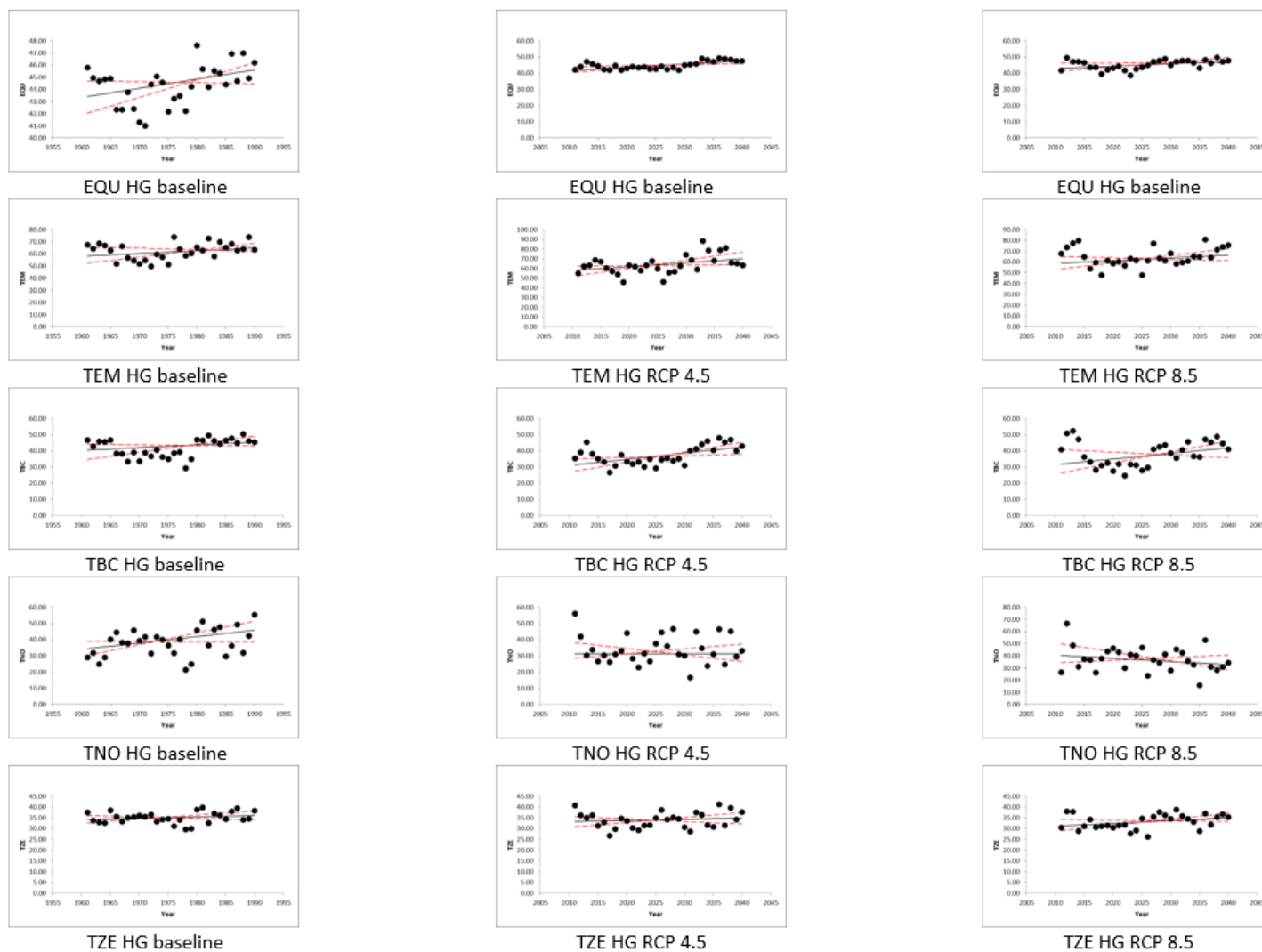


**Figura AIII.2** Gráficos de tendência anual para TNn, usando estimativa de Sen, para o Eta/MIROC5, por zona climática. Fonte: Elaboração própria

**Quadro AIII.2.** Tendência anual para TNn, usando estimativa de Sen, para o Eta/MIROC5, por zona climática

Zona climática	Primeiro ano	Último ano	n	Teste Z	Significância	Q	Tendência (para 95% de confiança)
<b>Baseline</b>							
EQU	1961	1990	30	1.28	#	0.024	TnSA
TEM	1961	1990	30	0.75	#	0.021	TnSA
TBC	1961	1990	30	1.00	#	0.020	TnSA
TNO	1961	1990	30	1.43	#	0.012	TnSA
TZE	1961	1990	30	1.75	+	0.018	TnSA
<b>RCP 4.5</b>							
EQU	2011	2040	30	0.29	#	0.010	TnSA
TEM	2011	2040	30	0.29	#	0.006	▪ TnSA
TBC	2011	2040	30	-0.29	#	-0.008	TnSR
TNO	2011	2040	30	-0.39	#	-0.004	TnSR
TZE	2011	2040	30	-1.43	#	-0.023	TnSR
<b>RCP 8.5</b>							
EQU	2011	2040	30	-0.61	#	-0.014	TnSR
TEM	2011	2040	30	-0.39	#	-0.015	TnSR
TBC	2011	2040	30	-0.29	#	-0.008	TnSR
TNO	2011	2040	30	0.14	#	0.003	TnSA
TZE	2011	2040	30	-0.29	#	-0.007	TnSR

Fonte: Elaboração própria



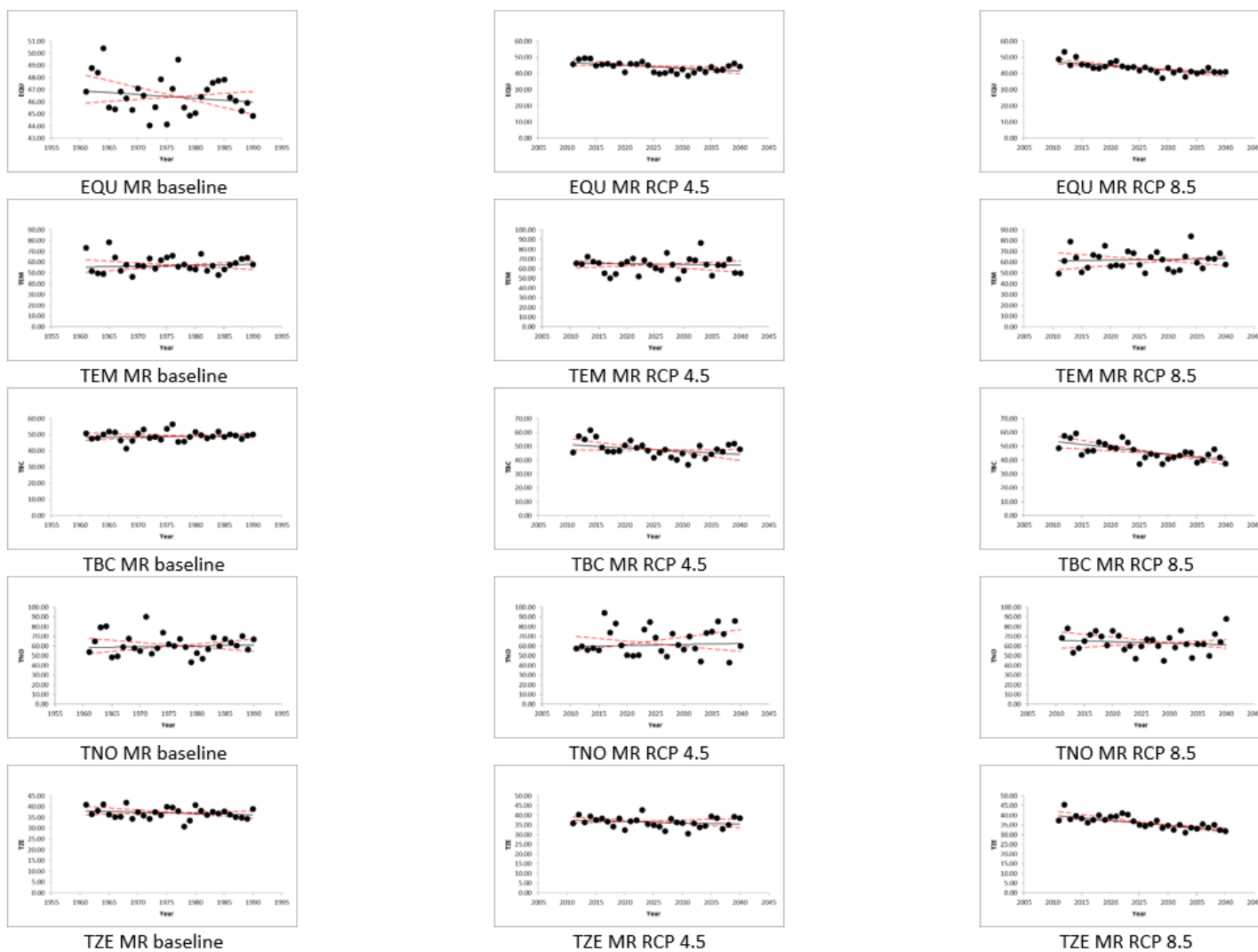
**Figura AIII.3** Gráficos de tendência anual para RX1day, usando estimativa de Sen, para o Eta/HadGEM2-ES, por zona climática. Fonte: Elaboração própria

**Quadro AIII.3.** Tendência anual para RX1day, usando estimativa de Sen, para o Eta/HadGEM2-ES, por zona climática

Zona climática	Primeiro ano	Último ano	n	Teste Z	Significância	Q	Tendência (para 95% de confiança)
<b>Baseline</b>							
EQU	1961	1990	30	1.75	+	0.076	TSA
TEM	1961	1990	30	1.14	#	0.223	TnSA
TBC	1961	1990	30	1.46	#	0.169	TnSA
TNO	1961	1990	30	1.86	+	0.393	TnSA
TZE	1961	1990	30	0.96	#	0.062	TnSA
<b>RCP 4.5</b>							
EQU	2011	2040	30	3.10	**	0.194	TSA
TEM	2011	2040	30	2.21	*	0.402	TSA
TBC	2011	2040	30	2.64	**	0.382	TSA
TNO	2011	2040	30	0.00	#	-0.002	TnSA
TZE	2011	2040	30	0.71	#	0.053	TnSA
<b>RCP 8.5</b>							
EQU	2011	2040	30	2.25	*	0.149	TSA
TEM	2011	2040	30	1.25	#	0.255	TnSA
TBC	2011	2040	30	1.36	#	0.346	TnSA
TNO	2011	2040	30	-1.28	#	-0.263	TnSR
TZE	2011	2040	30	1.68	+	0.128	TnSA

Fonte: Elaboração própria

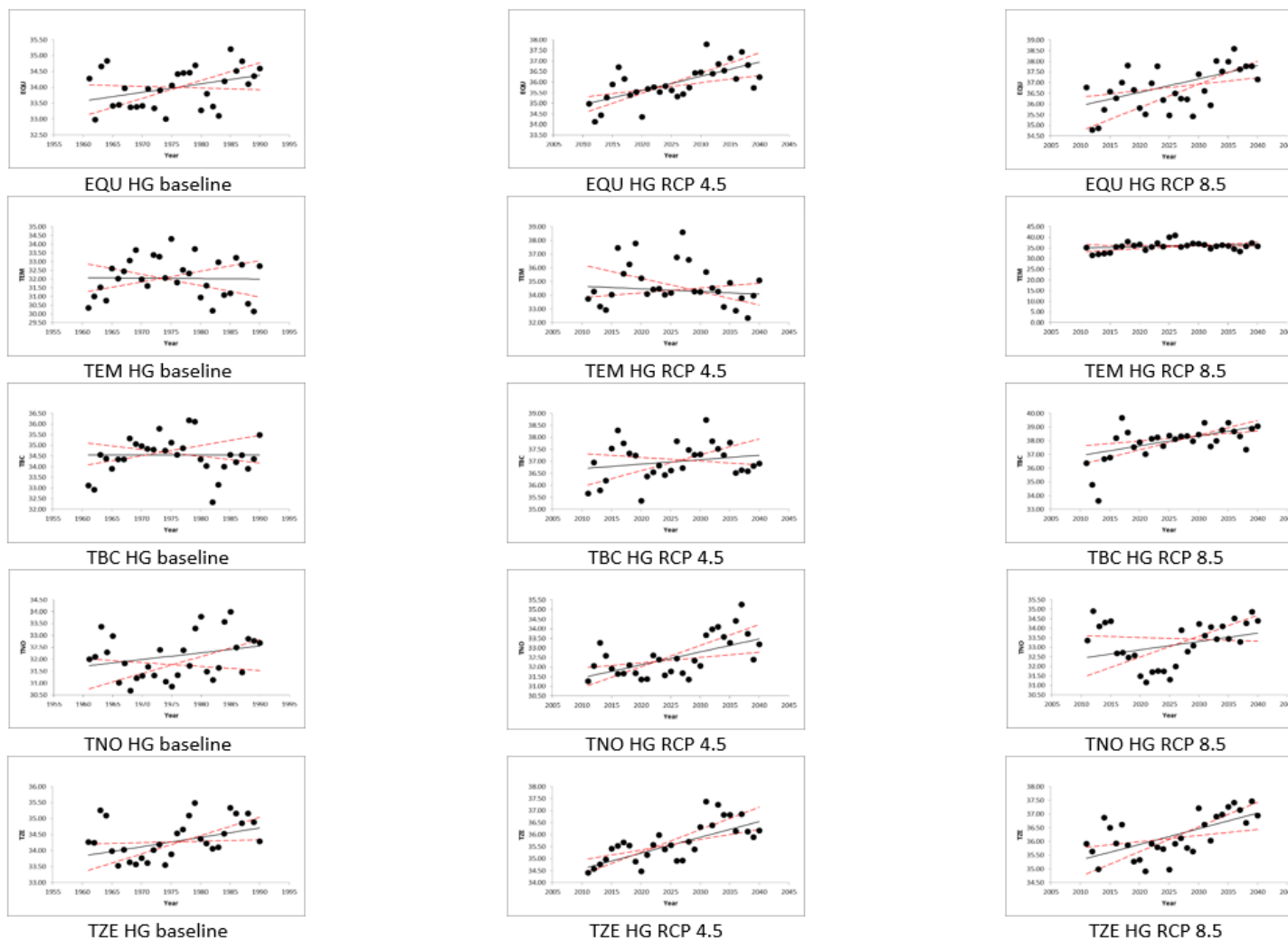




**Figura AIII.4** Gráficos de tendência anual para RX1day, usando estimativa de Sen, para o Eta/MIROC5, por zona climática. Fonte: Elaboração própria

**Quadro AIII.4.** Tendência anual para RX1day, usando estimativa de Sen, para o Eta/MIROC5, por zona climática

Zona climática	Primeiro ano	Último ano	n	Teste Z	Significância	Q	Tendência (para 95% de confiança)
<b>Baseline</b>							
EQU	1961	1990	30	-1.25	#	-0.032	TnSR
TEM	1961	1990	30	0.54	#	0.089	TnSA
TBC	1961	1990	30	0.46	#	0.035	TnSA
TNO	1961	1990	30	0.32	#	0.089	TnSA
TZE	1961	1990	30	-1.11	#	-0.061	TnSR
<b>RCP 4.5</b>							
EQU	2011	2040	30	-2.43	*	-0.175	TSR
TEM	2011	2040	30	-0.71	#	-0.065	TnSR
TBC	2011	2040	30	-1.89	+	-0.241	TnSR
TNO	2011	2040	30	0.46	#	0.112	TnSA
TZE	2011	2040	30	-0.93	#	-0.064	TnSR
<b>RCP 8.5</b>							
EQU	2011	2040	30	-4.75	***	-0.243	TSR
TEM	2011	2040	30	0.32	#	0.067	TnSA
TBC	2011	2040	30	-3.53	***	-0.468	TSR
TNO	2011	2040	30	-0.43	#	-0.150	TnSR
TZE	2011	2040	30	-4.32	***	-0.262	TSR

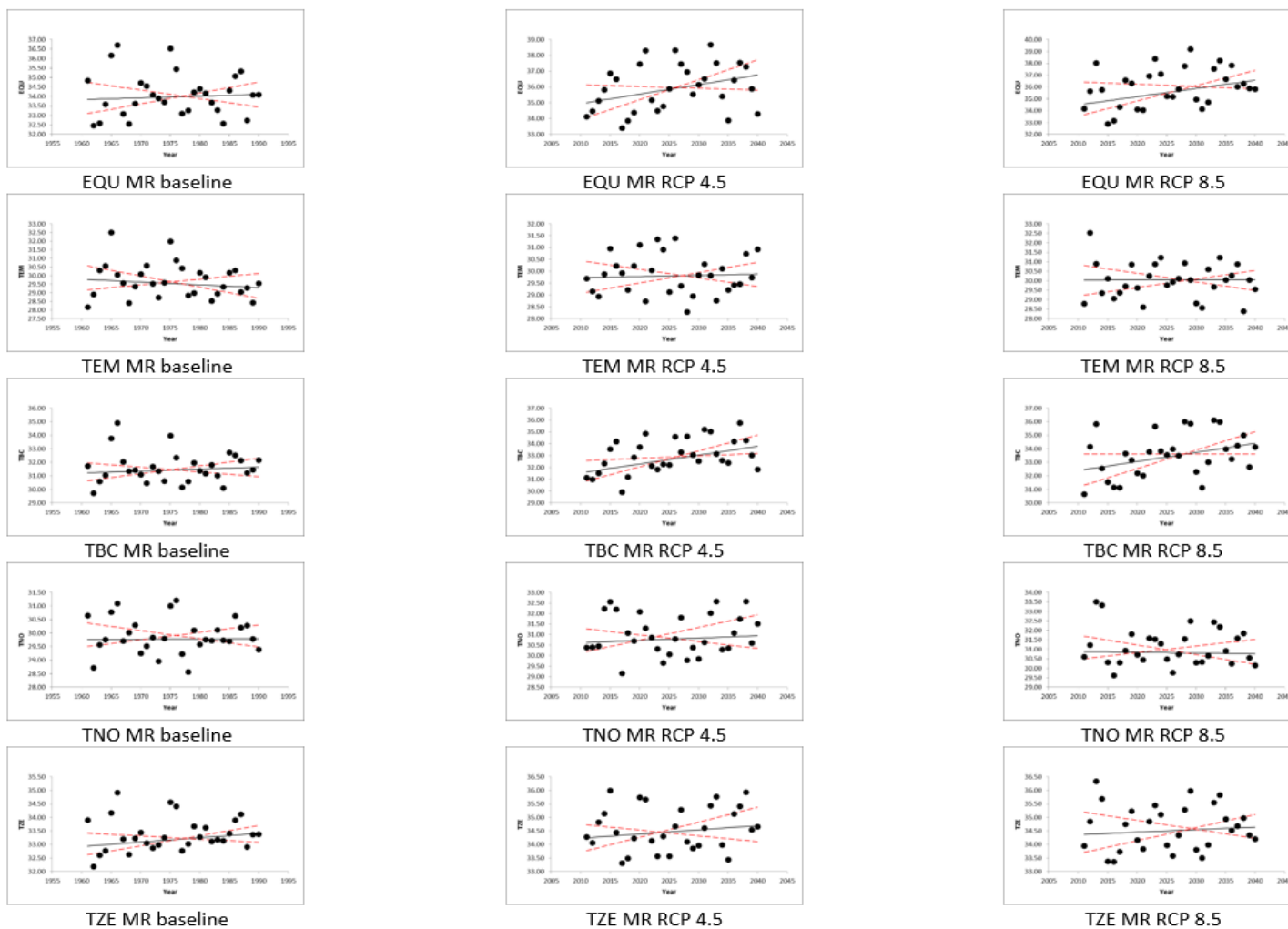


**Figura AIII.5** Gráficos de tendência anual para Temp7dias, usando estimativa de Sen, para o Eta/HadGEM2-ES, por zona climática. Fonte: Elaboração própria

**Quadro AIII.5.** Tendência anual para Temp7dias, usando estimativa de Sen, para o Eta/HadGEM2-ES, por zona climática

Zona climática	Primeiro ano	Último ano	n	Teste Z	Significância	Q	Tendência (para 95% de confiança)
<b>Baseline</b>							
EQU	1961	1990	30	1.71	+	0.027	TnSA
TEM	1961	1990	30	0.00	#	-0.003	ST
TBC	1961	1990	30	0.00	#	0.000	ST
TNO	1961	1990	30	1.46	#	0.028	TnSA
TZE	1961	1990	30	2.28	*	0.029	TSA
<b>RCP 4.5</b>							
EQU	2011	2040	30	3.75	***	0.067	TSA
TEM	2011	2040	30	-0.68	#	-0.020	TnSR
TBC	2011	2040	30	1.07	#	0.019	TnSA
TNO	2011	2040	30	3.14	**	0.067	TSA
TZE	2011	2040	30	4.28	***	0.066	TSA
<b>RCP 8.5</b>							
EQU	2011	2040	30	2.75	**	0.063	TSA
TEM	2011	2040	30	1.57	#	0.053	TnSA
TBC	2011	2040	30	3.39	***	0.071	TSA
TNO	2011	2040	30	1.68	+	0.044	TnSA
TZE	2011	2040	30	3.25	**	0.057	TSA

Fonte: Elaboração própria



**Figura AIII.6** Gráficos de tendência anual para Temp7dias, usando estimativa de Sen, para o Eta/ MIROC5, por zona climática. Fonte: Elaboração própria

**Quadro AIII.6.** Tendência anual para Temp7dias, usando estimativa de Sen, para o Eta/MIROC5, por zona climática

Zona climática	Primeiro ano	Último ano	n	Teste Z	Significância	Q	Tendência (para 95% de confiança)
<b>Baseline</b>							
EQU	1961	1990	30	0.32	#	0.009	TnSA
TEM	1961	1990	30	-0.71	#	-0.017	TnSR
TBC	1961	1990	30	0.68	#	0.014	TnSA
TNO	1961	1990	30	0.07	#	0.001	TnSA
TZE	1961	1990	30	1.25	#	0.016	TnSA
<b>RCP 4.5</b>							
EQU	2011	2040	30	1.75	+	0.060	TnSA
TEM	2011	2040	30	0.21	#	0.005	TnSA
TBC	2011	2040	30	2.46	*	0.075	TSA
TNO	2011	2040	30	0.36	#	0.011	TnSA
TZE	2011	2040	30	0.71	#	0.015	TnSA
<b>RCP 8.5</b>							
EQU	2011	2040	30	1.61	#	0.069	TnSA
TEM	2011	2040	30	0.00	#	0.001	ST
TBC	2011	2040	30	2.03	*	0.067	TSA
TNO	2011	2040	30	-0.21	#	-0.004	TnSR
TZE	2011	2040	30	0.50	#	0.009	TnSA

Fonte: Elaboração própria

Legenda:

\*\*\* - Tendência ao nível de significância de  $\alpha = 0.001$

\*\* - Tendência ao nível de significância de  $\alpha = 0.01$

\* - Tendência ao nível de significância de  $\alpha = 0.05$

+ - Tendência ao nível de significância de  $\alpha = 0.1$

# - Nível de significância maior que 0.1

ST - Sem tendência

TnSA - Tendência não significativa de aumento

TSA - Tendência significativa de aumento

TnSR - Tendência não significativa de redução  
TSR - Tendência significativa de redução

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, L.V., ZHANG, X., PETERSON, T.C., CAESAR, J., GLEASON, B., KLEIN TANK, A., HAYLOCK, M., COLLINS, D., TREWIN, B., RAHIMZADEH, F., TAGIPOUR, A., AMBENJE, P., RUPA KUMAR, K., REVADEKAR, J., GRIFFITHS, G., VINCENT, L., STEPHENSON, D., BURN, J., AGUILAR, E., BRUNET, M., TAYLOR, M., NEW, M., ZHAI, P., RUSTICUCCI, M., VAZQUEZ-AGUIRRE, J.L.. 2005. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. **J. Geophys. Res.** **111**. D05109, doi: 10.1029/2005JD006290.
- ALVES, L.M., MELO, A.B.C., CHOU, S.C. & NOBRE, P. 2000. Estudo comparativo entre a precipitação sazonal simulada pelo modelo ETA e observada sobre o Brasil. p. 1029-1035. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais**. 2000. SBMET. Rio de Janeiro.
- ALVES, L.M., CHOU, S.C. & MARENGO, J.A. 2004. Avaliação das previsões de chuvas sazonais do modelo ETA climático sobre o Brasil. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia. 2004. **Anais**. Fortaleza.
- ALVES, L.M. 2009. Clima da Região Centro-Oeste do Brasil. p. 235-241. In: CAVALCANTI, N.J. *et al.* (org.). **Tempo e clima no Brasil**. 1ª ed. Oficina de Textos. São Paulo.
- ARIAS, P.A., FU, R. & MO, K.C. 2012. Decadal variation of rainfall seasonality in the North American monsoon region and its potential causes. **Journal of Climate** **25** (12): 4258-74.
- AUSTROADS, 2004. Impact of Climate Change on road infrastructures. **National Library of Australia** 1a Edição ISBN 0 85588 692 7.
- BAETTIG, M.B., WILD, M. & IMBODEN, D.M. 2007. A climate change index: where climate change may be most prominent in the 21st century. **Geophys. Res. Lett.** **34**: L01705.
- BANCO MUNDIAL, 2010: Desenvolvimento e mudança climática. Relatório sobre o Desenvolvimento Mundial. São Paulo, SP: Editora Unesp. 440 pp.
- BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. 2008. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: ABEDA.
- BRASIL. 2009. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília. Seção 1. Edição Extra. p. 109-10.
- BUSTAMANTE, J.F., GOMES, J.L., CHOU, S.C. & ROZANTE, J.R. 2002. Evaluation of april 1999 rainfall forecasts over South America using the Eta Model. **Revista Climanalise** **14** (5): 1-17.
- CAVALCANTI, I.F.A. *et al.* 1982. Análise de um caso de atividade convectiva associada a linhas de instabilidade na região sul e sudeste do Brasil. INPE. São José dos Campos.
- CAVALCANTI, I.F.A., MARENGO, J.A., PRAKKI, S., NOBRE, C.A., TROSNIKOV, I., CAMARGO JUNIOR, H., CASTRO, C., SANCHES, M.B. & SAMPAIO, G. 2000. Características climatológicas sobre a América do Sul nos resultados de uma simulação de 10 anos com o MCGA CPTec/COLA na versão T62L28. p. 3552-3556. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais**. 2000. SBMET. Rio de Janeiro.
- CAVALCANTI, I.F.A., MARENGO, J.A., PRAKKI, S., NOBRE, C.A., TROSNIKOV, I., CAMARGO JUNIOR, H., CASTRO, C., SANCHES, M.B. & SAMPAIO, G. 2002. Global climatological features in a simulation using the CPTec-COLA AGCM. **Journal of Climate** **15** (21): 2965-2988.
- CHOU, S.C., LYRA, A., MOURÃO, C., DEREZYNSKI, C., PILOTTO, I., GOMES, J., BUSTAMANTE, J., TAVARES, P., SILVA, A., RODRIGUES, D., CAMPOS, D., CHAGAS, D., SUEIRO, G., SIQUEIRA, G., NOBRE, P. & MARENGO, J. 2014a. Evaluation of the Eta simulations nested in three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change** **3**: 438-454.
- CHOU, S.C., LYRA, A., MOURÃO, C., DEREZYNSKI, C., PILOTTO, I., GOMES, J., BUSTAMANTE, J., TAVARES, P., SILVA, A., RODRIGUES, D., CAMPOS, D., CHAGAS, D., SUEIRO, G., SIQUEIRA, G. & MARENGO, J. 2014b. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5. Downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change** **3**: 512-525.
- COSTA DOS SANTOS, C.A.; BRITO, J.I.B.; RAO, T.V.R. & MENEZES, H.E.A. 2009. Tendências dos índices de precipitação no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia** **24** (1): 39-47.
- CHOU, S.C., ROZANTE, J.R. & BUSTAMANTE, J.F. 2000. Influência da resolução horizontal nas condições iniciais e contorno nas previsões de chuvas tropicais. p. 1592-1598. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais**. 2000. SBMET. Rio de Janeiro.



- COCHRAN, I., 2009. Climate Change Vulnerabilities and Adaptation possibilities for transport infrastructures in France. **Climate Report Research**. Issue n°18
- COLLINS, M. & KNUTT, R. (orgs.). 2013. Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. Pp. 1136. In: STOCKER et al., (eds.). **Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom.
- CUSTÓDIO, M.A.M. & HERDIES, D.L. 1994. O jato de baixos níveis a leste da cordilheira dos Andes – um estudo de caso. In: VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais**. SBMET. Belo Horizonte.
- DNAE / CETESB. 1980. Drenagem Urbana, Manual de Projeto, 2ª Edição, São Paulo.
- DIFFENBAUGH, N.S. & GIORGI, F. 2012. Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble. **Clim. Chang.** **114**: 813–822.
- DIOGO, F.J.A. 2014. **Apostila de Drenagem de Rodovias**. Rio de Janeiro.
- DNIT/MT. **Manual de Drenagem de Rodovias**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: 2006.
- DONAT, M.G., ALEXANDER L.V., YANG, H., DURRE, I., VOSE, R., DUNN, R.J.H., WILLETT, K.M., AGUILAR, E., BRUNET, M., CAESAR, J., HEWITSON, B, JACK, C, KLEIN TANKAMG, KRUGER, A.C., MARENGO, J.A., PETERSON, T.C., RENOMM, ORIA ROJAS., C., RUSTICUCCI, M., SALINGER, J., ELRAYAH, A.S., SEKELE, S.S., SRIVASTAVA, A.K., TREWIN, B., VILLARROEL, C., VINCENT, L.A., ZHAI, P., ZHANG, X. & KITCHING, S. 2013. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. **J Geophys Res. Atmos.** **118** (5): 2098–2118.
- DUURSMA, E. 2002. Rainfall, River flow and temperature profile trends. Consequences for water resources. Amsterdam.
- EASTERLING, D., MEEHL, G., PARMESAN, C., CHANGNON, S., KARL, T. & MEARN, L. 2000. Climate Extremes: Observations, Modeling and Impacts. **Science** **289**: 2068–74.
- ESPINOZA J.C., GUYOT, J.L., RONCHAIL, J., COCHONNEAU, G., FILIZOLA, N., FRAIZY, P., LABAT, D., DE OLIVEIRA E., JULIO ORDONEZ, J. & VAUCHEL, P. 2009 a. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974-2004). **Journal of Hydrology** **375** (3-4): 297-311.
- ESPINOZA, J.C., RONCHAIL, J., GUYOT, J.L., COCHONNEAU, G., NAZIANO F., LAVADO, W., DE OLIVEIRA, E., POMBOSA, R. & VAUCHEL, P. 2009 b. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). **International Journal of Climatology** **29** (11): 1574-1594.
- EUROPEAN COMMISSION, 2012. **Impacts of Climate Change on Transport: A Focus on Road and Rail Transport Infrastructure**. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- FERNANDES, K.A. & SATYAMURTY, P. 1994. Cavados invertidos na região central da América do Sul. In: VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais**. SBMET. Belo Horizonte.
- FHAW – Federal Highway Administration. 2012. **Climate Change and Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework**.
- FRICH, P., ALEXANDER, L.V., DELLA-MARTA, P., GLEASON, B., HAYLOCK, M., KLEIN TANK, A. M.G. & PETERSON, T. 2002. Observed Coherent Changes in Climatic Extremes during the Second Half of the Twentieth Century. **Climate Research** **19**: 193–212.
- GAN, M.A. & RAO, V.B., 1991. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**. **119** (5): 1293-1302.
- GARDINER, L., FIRESTONE, D., WAIBL, G., MISTAL, N., VAN REENAN, K., HYNES, D, SMART, J., BYFIELD, J., OLDFIELD, S., ALLAN, S., KOUVELIS, B., TAIT, A., CLARK, A., 2008a. Climate Change Effects on the Land Transport Network Volume one: Literature Review and Gap Analysis. NZ Transport Agency Research **Report 378**.
- GARDINER, L., FIRESTONE, D., OSBORNE, A., KOUVELIS, B., CLARK, A., TAIT, A., 2008b. Climate Change Effects on the Land Transport Network. Volume two: approach to risk management. NZ Transport Agency Research **Report 378**.
- Goossens, C.; Berger, A. 1986. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. *Annales Geophysicae*, v.4 n.B4, p.385-400.
- GRIM, A.M. 2009. Clima da Região Sul do Brasil. In: CAVALCANTI, N.J. *et al.* (org.). **Tempo e clima no Brasil**. 1ª ed. Oficina de Textos. São Paulo.
- GROISMAN, P., KNIGHT, R., EASTERLING, D., KARL, T., HEGERL, G. & RAZUVAEV V. 2005. Trends in tense precipitation in the climate record. **Journal of Climate** **18**: 1326-1350.

- HASTENRATH, S. & HELLER, L., 1977. Dynamics of climatic hazard in the northeast Brazil. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society** **103** (435): 77-92.
- 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.
- HIGHWAY AGENCY. 2009. **Climate Change Adaptation Strategy and Framework**. Revision B. USA. 31 p.
- IBGE. 2014. Mapa de Climas Zonais. Disponível em: <[http://downloads.ibge.gov.br/downloads\\_geociencias.htm](http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm)>. Acessado em: Fevereiro de 2015.
- IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2007. Summary for policymakers. In: SOLOMON S, QIN D, MAMMING M, CHEN Z, MARQUIS M, AVERYT KB, TIGNOR M, MILLER HL (eds.) **Climate change 2007: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge.
- IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2007a. **Climate change impacts, adaptation and vulnerability. In: Climate Change 2007, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report (AR-4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**. Cambridge University Press. Cambridge, UK, and New York, NY, USA. 976 p.
- IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2007b. **Climate Change 2007: The Physical science basis. In: Climate Change 2007, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report (AR-4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**. Brussels.
- IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2014a. Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. 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 & L.L. WHITE (eds.). **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1132 p.
- IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2014b. Climate Change. Glossary In: EDENHOFER, O., R. PICHSMADRUGA, Y. SOKONA, E. FARAHANI, S. KADNER, K. SEYBOTH, A. ADLER, I. BAUM, S. BRUNNER, P. EICKEMEIER, B. KRIEMANN, J. SAVOLAINEN, S. SCHLÖMER, C. VON STECHOW, T. ZWICKEL AND J.C. MINX (eds.). 2014. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPR/DPP/DNIT. 2004. **Assessoria técnica na área de avaliação de desempenho de pavimentos típicos brasileiros**. Relatório Final. Tomo I. ENECON S.A.
- KARL, T.R., NICHOLLS, N. & GREGORY, J. 1997. The coming climate. **Scientific American**, 78-83.
- KAYANO, M.T. & ANDREOLI, R.V. Clima da Região Nordeste do Brasil. p. 212-233. In: CAVALCANTI, N.J. *et al.* (org.). **Tempo e clima no Brasil**. 1ª ed. Oficina de Textos. São Paulo.
- KENDALL, M. G. (1975), Rank correlation measures. Charles Griffin: London, U.K, p.220.
- KOETSE, M.J. & RIETVELD, P. 2009. The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings. **Transportation Research Part D** **14**: 205-221
- KOUSKY, V.E. & CAVALCANTI, I.F.A. 1984. Eventos oscilação sul – El Niño: características, evolução e anomalias de precipitação. **Ciência e Cultura**. **36** (11): 1888-1899.
- KOUSKY, V.E. & CHU, P.S. 1978. Fluctuations in annual rainfall for northeast Brazil. **J. Meteorological Society of Japan** **56** (5):457-465.
- MACHADO, R.D. & ROCHA, R.P. 2011. Previsões climáticas sazonais sobre o Brasil: avaliação do RegCM3 aninhado no modelo global CPTEC/COLA. **Revista Brasileira de Meteorologia** **26** (1): 121-136.
- MAGRIN, G., MARENGO, J., BOULANGER, J.P., BUCKERIDGE, M.S., CASTELLANOS, E., POVEDA, G., SCARANO, F.R. & VICUÑA, S. 2014. Central and South America. In: **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of

- Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- MANN, H. B. 1945. Econometrica. **The Econometric Society** **13** (3): 245-259.
- MANYU, C. 2013. **Estudo e mapeamento de vulnerabilidades a extremos climáticos no Estado do Paraná**. Relatório de pesquisa de Pós-doutorado. IVIG/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ. 106 p.
- MARENGO, J.A. 2004. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. **Theoretical and Applied Climatology** **78** (1-3): 79-96.
- MARENGO, J.A., ALVES, L., VALVERDE, M., ROCHA, R. & LABORBE, R. 2007. **Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais**. Relatório 5 DCBio. MMA. Brasília.
- MARENGO, J.A., AMBRIZZI T., ROCHA, R.P., ALVES, L.M., CUADRA, S.V., VALVERDEM, F.S., TORRES, R.R. & SANTOS, D.C. 2010 a. Future change of climate in South America in the late XXI century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Clim. Dyn.** **35**: 1073–1097.
- MARENGO, J.A., CAVALCANTI, I.F.A., PRAKKI, S., NOBRE, C.A., TROSNIKOV, I., BONATTI J.P., MANZI A.O., CANDIDO, L., CAMARGO JUNIOR, H., CASTRO, C., SANCHES, M.B. & SAMPAIO, G. 2003. Assessment of regional seasonal rainfall predictability using the CPTEC/COLA atmospheric GCM. **Climate Dynamics** **21**: 459-475.
- MARENGO, J.A., CHOU, S.C., TORRES, R.R., GIAROLLA, A., ALVES, L.M. & LYRA, A. 2014. **Climate Change in Central and South America: Recent Trends, Future Projections, and Impacts on Regional Agriculture**. CCAFS Working Paper n° 73. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CAAFS). Copenhagen, Denmark. Available online at: [www.ccafs.cgiar.org](http://www.ccafs.cgiar.org).
- MARENGO, J.A., NOBRE, C.A., CHOU, S.H., TOMASELLA, J., SAMPAIO, G., ALVES, L.M., OBREGÓN, G.O., SOARES, W.R., BETTS, R. & KAY, G. 2011. **Dangerous climate change. A Brazil–UK analysis of climate change and deforestation impacts in the Amazon**. 55 pp.
- MARENGO, J.A. & ROGERS, J. C. 2000. Polar outbreaks in the Americas: Assessments and impacts during recent and past climates. In: MARKGRAF, V. (ed.). **Present and past inter-hemispheric climate linkages in the Americas and their societal effects**. Cambridge University Press. England.
- MARENGO, J.A., RUSTICUCCI, M., PENALBA, O. & RENOM M. 2010 b. An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century. Part 2: historical trends. **Clim. Chang.** **98**: 509–529.
- MARENGO, J.A & VALVERDE, M.C. 2007. Caracterização do Clima no século XX e Cenário de Mudanças de Clima para o Brasil no século XXI usando modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência**. Edição n° 8. Campinas/SP
- MATSUMOTO, S.K. *et al.* 1982. The structure and the role of a subsynoptic-scale cold vortex on the heavy precipitation. **Journal of the Meteorological Society of Japan** **60**: 339-354.
- MEEHL, G., KARL T., EASTERLING, D., CHANGNON, S., PIELKE, R., CHANGNON, D., EVANS, J., GROISMAN, P., KNUTSON, T., KUNKEL, K., MEARN, L., PARMESAN, C., PULWARTY, R., ROOT, T., SYLVES, R., WHETTON, P. & ZWIERS, F. 2000. An Introduction to Trends in Extreme Weather and Climate Events: Observations, Socioeconomic Impacts, Terrestrial Ecological Impacts and Model Projections. **Bull. Am. Meteor. Soc.** **81**: 413–416.
- MENDONÇA, F. & DANNI-OLIVEIRA, I.M. 2007. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. Oficina de Textos. São Paulo/SP.
- MEYER, M.D. 2008: **Design standards for US transportation infrastructure: the implications of climate change**. Georgia Institute of Technology, Atlanta, 30 pp. Transportation Research Board of the National Academies, TRB Publications Index. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/sr-290Meyer.pdf>. Acessado em: Janeiro de 2015.
- MOURA *et al.* 2007. Clima e água de chuva no semiárido. p. 37-59. In: BRITO, L.T.L., MOURA, M.S.B. & GAMA, G.F.B. (eds.). **Potencialidades da água de chuva no Semi-Árido brasileiro**. Embrapa Semi-Árido. Petrolina.
- MOURA, A.D. & SHUKLA, J. 1981. On the dynamics of droughts in the northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences** **38**: 2653-2675.
- NEMRY, F. DEMIREL, H., 2012, Impacts of Climate Change on Transport: A focus on road and rail transport infrastructures. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies. Luxembourg.
- NIMER, E. 1979. **Climatologia do Brasil**. SUPREN/IBGE. Rio de Janeiro. 421p.

- NJTPA – New Jersey Transportation Planning Authority, Climate Change Vulnerability and Risk Assessment of New Jersey's Transportation Infrastructure, April 2012.
- NOBRE, P. 1994. Variabilidade climática sobre o Atlântico tropical. Parte II: estudo de casos. In: VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais**. SBMET. Belo Horizonte.
- NOBRE *et al.* 2010. **Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo/SP. 32 p.
- NUNES, L.H. KOGA-VICENTE, A. & CANDIDO, D.H. 2009. Clima da região Sudeste do Brasil. In: CAVALCANTI, N.J. *et al.* (org.). **Tempo e clima no Brasil**. 1ª ed. Oficina de Textos. São Paulo.
- NUÑEZ, M.N., CIAPE, S.S.O., ROLLA, A., KALNAY, E. & CAI, M. 2008. Impact of land use and precipitation changes on surface temperature trends in Argentina. **Geophysical Research Letters** **113**: D06111.
- OBREGON G. & MARENGO, J.A. 2007. Caracterização do clima do Século XX no Brasil: Tendências de chuvas e temperaturas médias e extremas. Relatório 2. MMA/SBF. Brasília/DF.
- OLIVEIRA, A.S. 1986. **Interações entre sistemas na América do Sul e convecção na Amazônia**. Dissertação de mestrado. INPE. São José dos Campos.
- ÖNÖZ, B, BAYAZIT, M. C.. The power of statistical teste for trend detection, Turkish J. Eng. Env. Sci., v 27, p.247-251, 2003.
- OSWALD, M.R. e S. MCNEIL, 2012. Methodology for integrating adaptation to climate change into the transportation planning process. **Public Works Management &Policy** **18**(2), 145-166. Disponível em <http://pwm.sagepub.com/content/18/2/145.full.pdf+html>. Acessado em: Janeiro de 2015
- 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.
- PETERSON, T.C. *et al.* 2006. **Climate Variability and Change with Implications for Transportation**. Transportation Research Board of the National Academies, TRB Publications Index. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/sr290Many.pdf>. Acessado em: Janeiro de 2015
- QUADRO, M.F.L. & ABREU, M.L. 1994. Estudos de episódios de Zonas de Convergência do Atlântico Sul sobre a América do Sul. In: VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais**. SBMET. Belo Horizonte.
- QUADRO, M.F.L. *et al.* 1996. Climatologia e precipitação e temperatura no período de 1986 a 1996. **Revista Climanalise** **1**: 90.
- RAMOS, A.M., SANTOS, L.A.R. & FORTES, L.T.G. (orgs.). 2009. **Normais climatológicas do Brasil – 1961-1990**. INMET. Brasília, DF. 465 p.
- RAO, V.B. & RADA, K. 1990. Characteristics of rainfall over Brazil: annual variations and connections with the southern oscillations. **Theoretical and Applied Climatology** **42**: 81-91.
- RUSTICUCCI, M. & BARRUCAND., M. 2004. Observed trends and changes in temperature extremes in Argentina. **J. Climate**, **17**: 4099-4107.
- RUSTICUCCI, M., MARENGO, J.A., PENALBA, O. & RENOM, M. 2010. An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century. Part 1: mean values and variability. **Clim Chang** **98**: 493–508.
- SANTOS, C.A.C., BRITO, J.I.B. 2007. Análise dos índices de extremos para o semi-árido do Brasil e suas relações com TSM e IVDN. **Revista Brasileira de Meteorologia** **22** (3): 303-312.
- SANTOS, J.R.S. 2014. Avaliação de autocorrelações e complexidade de séries temporais climáticas no Brasil. Tese de Doutorado. UFRPE. Recife/PE. 114 p.
- MARQUES, G.L.O. & SANTOS, T L. 2009. **Seleção do Grau de Desempenho (PG) de Ligantes Asfálticos em Juiz de Fora**. MINERVA, UFJF.

- SATYAMURTY, P., DE CASTRO A.A., TOTA, J., DA SILVA GULARTE, L.E. & MANZI A.O. 2010. Rainfall trends in the Brazilian Amazon Basin in the past eight decades. **Theoretical and Applied Climatology** **99** (1-2): 139-148.
- SEN, O.L., WANG, Y. & WANG, B. 2004. Impact of Indochina deforestation on the East-Asian summer monsoon. **Journal of Climate** **17**: 1366-1380.
- SEN, P. K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendalls's tau. **Journal of the American Statistical Association** **63**: 1379-1389.
- SILLMANN, J., KHARIN, V.V., ZHANG, X., ZWIERS, F.W. & BRONAUGH, D. 2013 a. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: part 1. Model evaluation in the present climate. **J Geophys Res** **118**: 1716–1733.
- SILLMANN, J., KHARIN, V.V., ZWIERS, F.W., ZHANG, X. & BRONAUGH, D. 2013 b. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: part 2 Future climate projections. **J Geophys Res** **118**: 2473–2493.
- SILVA DIAS, M.A.F. & HALLAK, R. 1994. Análise de casos de formação de vórtices de ar frio. In: VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais**. SBMET. Belo Horizonte.
- SILVA, W.L., DERECZYNSKI, C., CHOU, S.C. & CAVALCANTI, I. 2014. Future changes in temperature and precipitation extremes in the State of Rio de Janeiro. **Am. J. Climate Change** **3**: 353-365.
- SNEYERS, R. 1975. Sur l'Analyse Statistique des Séries d'Observations. Organisation Météorologique Mondiale, 192 p.
- SOO HOO, W.K. & SUMITANI, M. 2005. **Climate Change will impact the Seattle Department of Transportation**. Office of City Auditor. Seattle. USA.
- STERN, E. & ZEHAVI, Y. 1990. Road safety and hot weather: a study in applied transport geography. **Trans. Inst. Brit. Geog.**, **15**: 102–111
- TECHNICAL COMMITTEE D.2 Road Pavements, 2012. Dealing with the effects of climate change on road pavements. 146pp. ISBN 2-84060-247. WRA – World Road Association
- TEIXEIRA, M. S. 2004. **Atividade de ondas sinópticas relacionadas a episódios de chuvas intensas na região Sul do Brasil**. Dissertação de Mestrado. Meteorologia. INPE. São Jose dos Campos/SP. 94 pp.
- TORRES, F.T.P. & MACHADO, P.J.O. 2008. **Introdução à Climatologia**. Geographica. Santo André/SP.
- TORRES, R.R., LAPOLA, D.M., MARENGO, J.A. & LOMBARDO, M.A. 2012. Socioclimatic hotspots in Brazil. **Clim. Chang.** **115**: 597–609.
- TORRES, R.R. & MARENGO, J.A. 2013. Climate change hotspots over South America: from CMIP3 to CMIP5 multi-model datasets. **Theoretical and Applied Climatology**. DOI 10.1007/s00704-013-1030-x.
- TORRES R.R. & MARENGO, J.A. 2013. Uncertainty assessments of climate change projections over South America. **Theoretical and Applied Climatology** **112**: 253-272.
- TORRES, R.R., MARENGO, J.A. & VALVERDE, M.C. 2009. **Projeções de Extremos Climáticos nas Regiões Metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro para o Final do Século XXI**.
- TRENBERTH, K. 2005. Uncertainty in hurricanes and global warming. **Science** **308**: 1753-1754.
- UFSC. 2013. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012**. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2. ed. CEPED/UFSC. Florianópolis. 126 p.
- University of Virginia and Virginia Department of Transportation. 2011. **Assessing Vulnerability and Risk of Climate Change Effects on Transportation Infrastructure**, Hampton Roads, VA Pilot.
- USDOT – U.S. Department of Transportation. 2008. **Impacts of Climate Change and Variability on Transportation Systems and Infrastructure**. Gulf Coast Study.
- VALVERDE, M.; ANDRADE, E. & MARENGO, J. 2009. Chuvas extremas sobre o Nordeste e Norte do Brasil no outono de 2009: uma análise local, presente e futura. In: Simpósio Internacional de Climatologia, Canela/RS. **Anais...** CD-ROM. SBMET.
- VALVERDE, M.C. & MARENGO, J. A. 2010. Mudanças na Circulação Atmosférica sobre a América do Sul para Cenários Futuros de Clima Projetados pelos Modelos Globais do IPCC AR4. **Revista Brasileira de Meteorologia** **25** (1): 125-145.
- VAREJÃO-SILVA, M.A. 2006. **Meteorologia e climatologia**. Versão digital, v. 2. Recife/PE.
- VERA, C., SILVESTRI, G., LIEBMANN, B. & GONZALEZ, P. 2006. Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. **Geophysical Research Letters** **33** (13): L13707-10.

- VINCENT, L., PETERSON, T., BARROS, V.R., MARINO, M.B., RUSTICUCCI, M., MIRANDA, G., RAMIREZ, E., ALVES, L.M., AMBRIZZI, T., BAEZ, J., BARBOSA DE BRITO, J.I., BERLATO, M., GRIMM, A.M., JAILDO DOS ANJOS, R., MARENGO, J.A., MEIRA, C., MOLION, L., MUNCUNIL, D.F., NECHET, D., REBELLO, E., ABREU DE SOUSA, J., ANUNCIAÇÃO, Y.M.T., QUINTANA, J., SANTOS, J., ONTANEDA, G., BAEZ J., CORONEL, G., GARCIA, V.L., VARILLAS, I.T., BIDEGAIN, M., CORRADI, V., HAYLOCK, M.R. & KAROLY, D. 2005. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America, 1960–2000. **The Journal of Climate** **18**: 5011–5023.
- VIRJI, H. 1981. A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds. **Monthly Weather Review** **109** (3): 599-610.
- WORLD ROADS ASSOCIATION, 2012. **Dealing with the Effects of Climate Change on Road Pavements**. Disponível em [www.piarc.org](http://www.piarc.org). Acesso em 30 de janeiro de 2015.
- WSDOT – Washington State Department of Transportation. 2011. **Climate Impacts Vulnerability Assessment**.
- YUE, S. & HASHINO, M. 2003. Temperature trends in Japan: 1900-1996. **Theoretical and Applied Climatology** **75**: 15-27.
- ZHANG, X. & YANG, F. 2004. **RClimDex (1.0) User Guide**. Climate Research Branch Environment Canada. Ontario, Canada. 22p.



## **Projeto PPE 18773**

### **PRODUTO 2**

**Prof. Emilio Lèbre La Rovere**

Coordenador do Projeto

**Prof. Mauricio Cardoso Arouca**

Coordenador do Programa de Planejamento Energético

**Prof. Romildo Dias Toledo Filho**

Diretor Superintendente da Fundação COPPETEC