



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 4 – Avaliação da Vulnerabilidade da Malha Rodoviária nos *Hotspots*.

Responsável:

Rio de Janeiro, 16 de setembro de 2015



Adaptação às Mudanças do Clima: Infraestrutura de Transporte

PRODUTO 4

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DA MALHA RODOVIÁRIA NOS *HOTSPOTS*

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

EXECUTOR: CentroClima/LIMA/COPPE

Setembro/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 de Mello Bandeira

Vânia Barcellos Gouvêa Campos

Apoio Administrativo:

Carmen Brandão

Elza Ramos

Pedro Baeta

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	1
INTRODUÇÃO	2
1. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE	5
2. DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE E TRATAMENTO DE DADOS	8
3. RESULTADOS.....	30
DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Matriz de juízos de valor para avaliação local das ações.....	14
Figura 2.	Malha rodoviária no <i>hotspot</i> Nível 1 (N1), definido pelo <i>ensemble</i> dos <i>hotspots</i> para Temp7dias e RX1day, dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, RCP 4.5 e RCP 8.5	32
Figura 3.	Malha rodoviária no <i>hotspot</i> Nível 2 (N2), definido pelo <i>ensemble</i> dos <i>hotspots</i> para RX1day, dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, RCP 4.5 e RCP 8.5	33
Figura 4.	Malha rodoviária no <i>hotspot</i> Nível 3 (N3), definido pelo <i>ensemble</i> dos <i>hotspots</i> para Temp7dias, dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, RCP 4.5 e RCP 8.5.....	34
Figura 5.	Malha rodoviária no <i>hotspot</i> Nível 4 (N4), definido pelo <i>ensemble</i> dos <i>hotspots</i> para Temp7dias e RX1day, dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, RCP 4.5 e RCP 8.5	35
Figura 6.	Malha rodoviária no <i>hotspot</i> Nível 5 (N5), definido pelo <i>ensemble</i> dos <i>hotspots</i> para Temp7dias e RX1day, dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, RCP 4.5 e RCP 8.5	36
Figura 7.	Índice de Irregularidade Internacional (IRI), para os segmentos de rodovia analisados	39
Figura 8.	Índice de Gravidade Global (IGG), para os segmentos de rodovia analisados.....	40
Figura 9.	Classificação da Geometria para os segmentos de rodovia analisados	41
Figura 10.	Classificação da Sinalização para os segmentos de rodovia analisados.....	42
Figura 11.	Rodovias existentes e planejadas	43
Figura 12.	Número de segmentos analisados para IRI e IGG, por Unidade da Federação e Distrito Federal	44
Figura 13.	Valor médio de IRI para os segmentos analisados, por Unidade da Federação e Distrito Federal	45
Figura 14.	Valor médio de IGG para os segmentos analisados, por Unidade da Federação e Distrito Federal	45
Figura 15.	Número de segmentos rodoviários por condição da Sinalização.....	46

Figura 16.	Participação relativa das cinco categorias de condição da Sinalização para os segmentos rodoviários analisados.....	46
Figura 17.	Número de segmentos rodoviários por condição da Geometria	47
Figura 18.	Participação relativa das cinco categorias de condição da Geometria para os segmentos rodoviários analisados.....	47
Figura 19.	Número de segmentos rodoviários analisados por tipo de Superfície.....	48
Figura 20.	Participação relativa dos tipos de Superfície para os segmentos rodoviários analisados	48
Figura 21.	Número de segmentos rodoviários por Unidade da Federação e Distrito Federal, para o critério de localização.....	50
Figura 22.	Extensão (em Km) dos segmentos rodoviários por Unidade da Federação e Distrito Federal, para o critério de localização.....	50
Figura 23.	Participação relativa das cinco categorias de agregação de Unidades da Federação e Distrito Federal na formação do PIB nacional	51
Figura 24.	Participação relativa das cinco categorias de administração/gestão de segmentos de rodovias analisados.....	52
Figura 25.	Volume Médio Diário - VMD para os segmento rodoviários analisados.....	52
Figura 26.	Percentual de segmentos rodoviários por categoria de Volume Médio Diário - VMD	53
Figura 27.	Volume Médio Diário – VMD, para os segmentos de rodovias analisados.....	54
Figura 28.	Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária – IVIR (período presente).....	56
Figura 29.	Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária – IVIR (período futuro)	57
Figura 30.	Histograma de distribuição do Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária (IVIR) presente	58
Figura 31.	Histograma de distribuição do Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária (IVIR) futuro (período de integração 2011-2040).....	58
Figura 32.	Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária presente padronizado (IVIRpresente-p).....	60

Figura 33. Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária futuro padronizado (IVIRfuturo-p).....	61
Figura 34. <i>Boxplot</i> para o Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária padronizado (IVIRp) presente e futuro	62
Figura 35. Segmentos de rodovias mais vulneráveis no presente, com base no Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária presente – IVIRp	63
Figura 36. Segmentos de rodovias mais vulneráveis no futuro, com base no Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária presente – IVIRp	64
Figura 37. Número de segmentos de rodovias nas Unidades da Federação e Distrito Federal de alta e muito alta vulnerabilidade, para o período presente (azul) e futuro (laranja).....	65
Figura 38. Extensão (km) da malha rodoviária por tipo de superfície de alta e muito alta vulnerabilidade, para o período presente	66
Figura 39. Extensão (km) da malha rodoviária por tipo de superfície de alta e muito alta vulnerabilidade, para o período futuro	66

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.	Critérios e PVF relativos à Sensibilidade	20
Quadro 2.	Critérios e PVF relativos à Capacidade Adaptativa	20
Quadro 3.	Critério de Exposição – PVF Presença em <i>hotspots</i>	21
Quadro 4.	Critério de Condições Técnicas da Rodovia – PVF Tipo de Superfície.....	21
Quadro 5.	Critério de Condições Técnicas da Rodovia – PVF, IGG, IRI, Geometria e Sinalização.....	21
Quadro 6.	Critério de Localização – PVF Unidade da Federação	22
Quadro 7.	Critério de Administração – PVF Gestão da Rodovia	22
Quadro 8.	Critério de Tráfego – PVF Volume Médio Diário.....	23
Quadro 9.	Distribuição de Pesos obtida pela Metodologia MACBETH	23
Quadro 10.	Distribuição de Pesos para os PVF do critério Condições Técnicas da Rodovia.....	23
Quadro 11.	Correspondência dos Critério de Condições Técnicas da Rodovia – PVF Tipo de Superfície.....	26
Quadro 12.	Correspondência dos critério de Condições Técnicas da Rodovia – PVF IGG e IRI	27
Quadro 13.	Correspondência do Critério de Administração – PVF Gestão da Rodovia.....	29
Quadro 14.	Abrangência espacial dos <i>hotspots</i> e percentual com relação a totalidade do território nacional e entre a totalidade da área dos <i>hotspots</i>	37
Quadro 15.	Caracterização da malha rodoviária, segundo níveis de exposição	37

APRESENTAÇÃO

Este relatório apresenta o conteúdo do Produto 4 – Análise de Vulnerabilidade da Malha Rodoviária nos *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 de avaliação de vulnerabilidade adotada no estudo, resgatando todas as atividades realizadas nas etapas anteriores, descritas nos Produtos 2 e 3, e as efetivadas para esta etapa do trabalho, que constituem o Produto 4.

O Item 2 discorre sobre aspectos gerais do Método Multicritério para Tomada de Decisão, a descrição do método e sua justificativa de uso para a definição dos critérios de avaliação de vulnerabilidade da malha rodoviária.

Por fim, no Item 3 são apresentados os resultados obtidos para os critérios de exposição e de localização, para efeito de avaliação da vulnerabilidade da infraestrutura rodoviária federal e estadual.

INTRODUÇÃO

O modo rodoviário possui participação predominante na matriz de transporte de cargas no Brasil. No transporte regional de cargas, tal participação é de 61,1%, seguido pelo transporte ferroviário, com 20,7%. O transporte aquaviário é responsável por 13,6% do total de cargas transportadas e os modais dutoviário e aéreo apresentam, respectivamente, 4,2% e 0,4% de participação (Brasil, 2014).

Em 2013, as rodovias brasileiras apresentavam extensão total de 1.713.885 km, sendo a maior parte não pavimentada (1.358.793 km, ou 79,3% do total), seguida das pavimentadas (202.589 km, ou 11,8% do total) e planejadas (152.503 km, ou 8,9% do total). Dentre as rodovias pavimentadas, 54,7% (110.842 km) são estaduais e 32,1% (64.921 km) federais. Nas rodovias federais pavimentadas predominam as de pista simples, com 89,9% (58.342 km) da extensão total. Quanto à distribuição no território, a malha rodoviária federal pavimentada tem a maior extensão na Região Nordeste (29,7%), seguida das regiões Sudeste (22,3%), Sul (18,1%), Centro-Oeste (17,2%) e Norte (12,7%) (*ibid*, 2014).

Entre 2004 e 2013, a extensão da malha rodoviária federal teve um crescimento de 12,1%. Tal ampliação pode ser considerada pouco expressiva, se comparada com a evolução de alguns indicadores que afetam a demanda por serviços de transporte, tais como o Produto Interno Bruto e a frota total de veículos, que mais que dobraram, no mesmo período. Evidencia-se, ainda, a baixa densidade da malha rodoviária pavimentada do Brasil (23,8 km/1.000 km²), quando comparada com a de outros países de dimensão territorial semelhante, como os Estados Unidos (445,2 km/1.000 km²), a China (359,9 km/1.000 km²) e a Austrália (46,0 km/1.000 km²) (*ibid*, 2014).

Ante o exposto, em 1995, teve início um programa de concessões de estradas federais a operadores privados. Posteriormente, foram concedidas também algumas rodovias estaduais. Os investimentos privados acumulados no período 1995-2013, correspondentes a 33,7 bilhões, foram investidos, sobretudo, em rodovias estaduais de São Paulo (53,3%), em rodovias federais (28,8%), e em rodovias estaduais do Paraná (9,3%). A Pesquisa CNT de Rodovias 2014 (CNT, 2014) revelou que 79.515 km (80,7%) estão atualmente sob gestão pública e 18.960 km (19,3%), sob gestão concedida. Importa referir que os trechos considerados como satisfatórios (critérios “Ótimo” ou “Bom”) nas estradas concedidas correspondem a 74,1% do total, enquanto nas estradas públicas este valor corresponde a apenas 25,9%. Evidencia-se, assim, o incremento na qualidade percebida pelos usuários das rodovias concedidas, por meio da ampliação da capacidade e de uma rigorosa manutenção da malha rodoviária.

Apesar da destacada predominância do modal rodoviário no deslocamento de bens e pessoas no território nacional, verifica-se que, em relação à extensão total da malha rodoviária no país, como frisado acima, apenas uma parcela está pavimentada. Em alguns casos, oferece condições de trafegabilidade com segurança e conforto, mas, em outros, risco para os usuários, por se apresentar em estado crítico, necessitando de intervenções em maior ou menor grau (CNT, 2014). Nesse contexto, torna-se pertinente avaliar a interferência que as mudanças climáticas exercem ou exercerão no modal rodoviário, pois, desde esse ponto de vista, alterações climáticas podem vir a representar um fator agravante no processo de deterioração das estradas, aumentando o risco de falhas e colapso, com a consequente interrupção de tráfego e registros de fatalidades, em casos mais extremos. Falhas operacionais relevantes e frequentes podem, inclusive, resultar em perdas econômicas, com repercussão em várias regiões.

De fato, é amplamente admitido que as mudanças climáticas serão potencialmente capazes de exercer crescente pressão sobre a infraestrutura de transporte rodoviário ao longo das próximas décadas, conforme atesta vasta literatura internacional (e.g., AUSTRROADS, 2004; MEYER, 2008; USDOT, 2008; COCHRAN, 2009; KOETSE & RIETVELD, 2009; EUROPEAN COMMISSION, 2012; NEMRY & DEMIREL, 2012; NJTPA, 2012; OSWALD & MCNEIL, 2012). Temperaturas mais altas, mudanças nos padrões de precipitação, aumento da variabilidade climática e eventos climáticos mais extremos (tempestades, incêndios florestais, inundações, seca) são apenas alguns dos elementos que podem interferir com o uso e gerenciamento desse tipo de infraestrutura (STERN & ZEHAVI, 1990; PETERSON *et al.*, 2006; GARDINER *et al.*, 2008a, 2008b; FWHA, 2012).

Vale salientar que os ativos que integram infraestrutura rodoviária são projetados para subsistir por um longo período de tempo, variando de anos (estradas, de um modo geral) a décadas (pontes, túneis). No entanto, tais ativos são, via de regra, concebidos com base em condições climáticas observadas, desconsiderando, amplamente, condições do clima futuro. Dessa forma, ao se utilizar dados climáticos históricos em projetos de infraestrutura, são projetados ativos potencialmente incapazes de resistir a futuros impactos associados a um padrão climático que não encontra paralelo no presente. Deficiências dessa natureza podem resultar em infraestruturas mais vulneráveis e com baixa capacidade adaptativa.

O IPCC (2013) define vulnerabilidade como *“a propensão ou predisposição de um sistema a ser adversamente afetado, englobando uma variedade de conceitos e elementos, incluindo a sensibilidade, ou susceptibilidade ao dano, e a falta de capacidade para lidar com adversidades e se*

adaptar". Assim, a capacidade adaptativa se refere à habilidade de ativo/sistema em responder a danos potenciais de natureza climática, envolvendo acomodação, ajustes e volta à normalidade.

A vulnerabilidade da malha rodoviária é, portanto, uma função da exposição e da capacidade adaptativa, sendo que a determinação da exposição é uma instância crítica, porém necessária, para subsidiar a definição de critérios para a seleção dos elementos da infraestrutura rodoviária com potencial de serem afetados adversamente pelos efeitos do clima futuro.

A escolha de índices de extremos climáticos relevantes é um primeiro e importante passo para a avaliação da vulnerabilidade do sistema rodoviário. No presente estudo, o clima futuro foi avaliado com base nos índices de extremo Temp7dias e RX1day, os quais foram utilizados para definir os *hotspots* climáticos de interesse para temperatura e precipitação, respectivamente. O critério adotado para a definição dos *hotspots* foi o limite inferior e superior de resistência de pavimento asfáltico a temperaturas extremas e da capacidade de suporte do sistema de microdrenagem a eventos pluviométricos extremos, os quais, se excedidos, causariam danos à estrutura física das rodovias, com o conseqüente comprometimento da sua funcionalidade.

A sensibilidade dos ativos rodoviários ao clima extremo foi definida com base em *proxies* (ou Pontos de Vistas Fundamentais – PVF) relacionados a condições técnicas das rodovias (Índice de Irregularidade Internacional (*International Roughness Index* – IRI e Índice de Gravidade Global – IGG, tipologia de superfície, geometria e sinalização). Com relação à exposição, foram investigados cinco *ensembles* dos modelos climáticos para Temp7dias e RX1day e respectiva interseção espacial com a malha rodoviária. Por fim, para efeito de análise da capacidade adaptativa, foram avaliados PVF de gestão/administração (concessão rodoviária), jurisdição (unidades da federação/PIB) e condições operacionais (Volume Médio Diário - VMD). A definição de tal leque de critérios e respectivas notas (pesos) foi amparada pelo julgamento de especialistas em infraestrutura rodoviária nacional.

Os dados de sensibilidade, exposição e capacidade adaptativa foram ajustados a critérios para a avaliação de vulnerabilidade, resultando no Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária – IVIR, o que possibilitou a identificação de regiões mais vulneráveis, onde estratégias adaptativas devem ser implementadas ou reforçadas, com desdobramentos no planejamento e gestão do sistema de transporte rodoviário.

A metodologia detalhada do estudo é apresentada na sequência.

1. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE

Neste trabalho, para efeito da identificação da vulnerabilidade da malha rodoviária federal e estadual às mudanças climáticas, foram adotados os seguintes passos:

- **Revisão da literatura internacional sobre os impactos de eventos climáticos 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, 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 adequabilidade do desempenho 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 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 Pfeistetter (1982), considerando o tempo de recorrência de cinco anos, o mínimo utilizado para dimensionamento de estruturas de drenagem.

- **Caracterização da malha rodoviária federal e estadual**

Esta etapa apresentou a metodologia de caracterização da infraestrutura de transporte rodoviário federal atual e planejada circunscrita aos *hotspots* definidos no passo anterior, bem como os critérios de análise dos impactos dos eventos climáticos relacionados às variáveis de temperatura e precipitação.

Foram escolhidos indicadores para a avaliação da vulnerabilidade para o pavimento asfáltico e dispositivos de microdrenagem, tendo como referência, respectivamente os índices de extremos Temp7dias e RX1day, por zona climática.

A malha rodoviária federal e estadual foi caracterizada do ponto de vista de aspectos administrativos e localização e o Volume Médio Diário (VMD) de tráfego, que é a média da quantidade de veículos (de passeio ou utilitários) que trafegam em uma rodovia diariamente, assim como condições técnicas, entre as quais o tipo de superfície, o Índice de Gravidade Global (IGG), o Índice de Irregularidade Longitudinal (*International Roughness Index – IRI*), geometria e sinalização.

- **Definição da exposição da infraestrutura**

Para efeito deste estudo, conforme definido no Produto 2 – Definição das variáveis climáticas relevantes e definição dos *hotspots* –, *hotspots* climáticos são regiões onde determinados níveis de temperatura e precipitação do clima futuro ultrapassam os limiares críticos de resistência da infraestrutura rodoviária. Ao serem ultrapassados, podem ocorrer danos à integridade física do pavimento de estradas e estruturas de drenagem, comprometendo a funcionalidade da rodovia, em graus diversos. *Hotspots* climáticos são, portanto, espaços particularmente suscetíveis à mudança no clima, sendo de especial interesse para se avaliar o comportamento da infraestrutura rodoviária, atual e planejada, face aos novos padrões climáticos.

Com o objetivo de reduzir as incertezas associadas aos cenários climáticos, a análise dos *hotspots* foi refinada com base na geração de *ensembles*, para o índice Temp7dias e RX1day, considerando os RCP 4.5 e RCP 8.5 dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5. A opção adotada foi a mais conservadora possível, ou seja, optou-se pela sobreposição dos *hotspots*, par a par.

- **Definição de Critérios para a Avaliação da Vulnerabilidade**

A avaliação da vulnerabilidade foi realizada, a partir da definição de critérios de sensibilidade e capacidade adaptativa, cuja seleção e agrupamento foi operacionalizada com base na opinião de especialistas brasileiros em infraestrutura rodoviária.

Cada critério é composto por Pontos de Vistas Fundamentais (PVF), conforme método MACBETH. Trata-se de um método multicritério para tomada de decisão, o qual foi aplicado por intermédio do software M-MACBETH. O uso do software facilita o processo, uma vez que elimina cálculos matemáticos que seriam feitos manualmente e reduz o tempo que se despenderia para efetuá-los, além de proporcionar a rápida construção de gráficos e figuras que facilitam a compreensão do problema e um estudo detalhado da influência de variação dos julgamentos.

- **Cálculo do Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária – IVIR**

Para a aplicação dos critérios de avaliação de vulnerabilidade, foi necessário, inicialmente, tratar as informações de forma que pudessem ser utilizadas como dados alfanuméricos e visualizadas em mapas. Para tal, foram disponibilizados a base georreferenciada do SNV (março de 2015) e os dados alfanuméricos do SGP (período 2013/2014) pelo DNIT.

A integração entre as duas bases foi realizada pelo código de referência dos trechos da Rede Rodoviária do PNV. Este código alfanumérico (com três letras e sete números) é o nível de divisão mais básico oferecido com informações georreferenciadas. Tal sistema de referência é subdividido em subtrechos homogêneos que possuem características comuns quanto a condições de superfície, tipo de revestimento, geometria e intervalo de extensão entre 300m a 20km.

Após o tratamento, os dados foram ajustados aos critérios para a avaliação de vulnerabilidade, cujo resultado é expresso por intermédio do Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária – IVIR.

2. DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE E TRATAMENTO DE DADOS

Nesta seção serão apresentados aspectos gerais do Método Multicritério para Tomada de Decisão, a descrição do método e sua justificativa de uso para a definição dos critérios de avaliação de vulnerabilidade da malha rodoviária.

2.1. Método do Multicritério para a Tomada de Decisão - Aspectos Gerais

O Método de Auxílio à Tomada de Decisão por Múltiplos Critérios – MCDM (*Multiple Criteria Decision Making*) encontra-se presente em vários estudos da área de Transportes, fornecendo resultados que atendem plenamente às necessidades do tomador de decisão. O método pode ser aplicado para diferentes tipos de problemas. Na área de infraestrutura rodoviária, Lisboa (2003) propõe a aplicação do método para a seleção de um melhor traçado para as futuras rodovias. Já no setor de Planejamento e Operação de Transportes, Costa *et. al.* (2001, apud Cruz 2007) propõem a aplicação da técnica do MCDM na avaliação de desempenho de empresas operadoras privadas de ônibus urbanos que atuam em regime consorciado, visando ao estabelecimento de um *benchmark*.

Em um problema multicritério, existem vários agentes atuantes e para se ter um melhor entendimento do método, é fundamental conhecer seus conceitos elementares. Mello *et. al.* (2003) apresentam os componentes básicos da decisão multicritério:

- **Decisores:** são os indivíduos que fazem escolhas e assumem preferências, como uma entidade única;
- **Analista:** é a pessoa encarregada de interpretar e quantificar as opiniões dos decisores, estruturar o problema, elaborar o modelo matemático e apresentar os resultados para decisão;
- **Modelo:** é o conjunto de regras e operações matemáticas que permitem transformar as preferências e opiniões dos decisores em um resultado quantitativo;
- **Alternativas:** são ações globais, ou seja, ações que podem ser avaliadas isoladamente. Podem representar diferentes cursos de ação, diferentes hipóteses sobre a natureza de uma característica, diferentes conjuntos de características etc.
- **Crítérios:** são as ferramentas que permitem a comparação das ações em relação a pontos de vistas particulares.

Segundo Gomes (1999), a MCDM auxilia analistas e decisores em situações nas quais se faz necessária a identificação de prioridades sob a ótica de múltiplos critérios, o que ocorre geralmente quando coexistem interesses conflitantes. Esses métodos também são muito utilizados como ferramenta de apoio à decisão e agregação de valores à informação.

Segundo Oliveira (2004 apud Cruz, 2007), servem essencialmente para quantificar as soluções segundo os critérios definidos e escalonados e para priorizar as soluções em ordem crescente de valor, ou gerar um novo subconjunto de soluções alternativas, por meio das preferências e consequências dos decisores.

Em função da enorme variedade e diferenças de características dos métodos multicritérios e também em função de alguns desses apresentarem complexos modelos matemáticos, algumas organizações esquecem a utilização desses métodos e continuam utilizando métodos tradicionais, que dependem, na maioria das vezes, do “feeling” do tomador de decisão. Desta forma, acabam prejudicando o que poderia ser melhorado com a utilização de um MCDM (Guglielmetti *et al.*, 2003).

Cruz (2007) comenta que, a partir da década de 70, alguns métodos passaram a receber atenção especial por parte dos especialistas e pesquisadores. Com o objetivo de achar soluções mais rápidas e consistentes aos problemas, foram desenvolvidas e adaptadas novas técnicas aos métodos que já existiam, ou passaram a existir, a partir de então. Alguns dos métodos mais utilizados e encontrados são:

- MACBETH;
- AHP (Analytic Hierarchy Process);
- MAUT (Multiattribute Utility Theory);
- ELECTRE I, II e III.

A série Electre, desenvolvida por Roy de 1971-1978, utiliza os conceitos fundamentais de concordância, discordância e a definição de seus valores limites aceitáveis, para não causar um nível inaceitável de descontentamento em nenhum dos critérios. O Electre I é um procedimento para a redução do número de soluções não dominadas. O Electre II se apoia no completo ordenamento das alternativas não denominadas por intermédio da construção das relações de sobreclassificação, baseada nas preferências do decisor. O Electre III é considerado o mais aceitável para os casos de incerteza e imprecisão na avaliação das alternativas envolvidas no problema de decisão e trata-se de um método mais sofisticado que o Electre II. Esse último permite analisar situações onde nem todas

as alternativas são comparáveis entre si devido a consideráveis diferenças de pontos de vista. Para isso o método cria conceitos de indiferença, preferência fraca, preferência estrita e por meio destes conceitos define seus limites (Roy & Bouyssou, 1993).

O Método de Utilidade Multiatributo (*Multiple Attribute Utility Theory* – MAUT) consiste na agregação de diferentes pontos de vistas em uma única função que deve ser subsequentemente otimizada. Esta teoria é usualmente aplicada para deter a importância atribuída a um critério em relação a outro e priorizar alternativas no contexto do problema que se coloca, a partir da construção de uma função matemática (Oliveira, 2004 apud Cruz, 2007). É considerada a mais tradicional entre todas as teorias existentes, sendo largamente utilizada no apoio à decisão e em problemas econômicos financeiros. Consiste na agregação de diferentes atributos dentro de uma única função, sendo o objetivo básico desse método, obter a alternativa que possa otimizar essa função (Keeny e Raiffa, 1976).

O método AHP – *Analytic Hierarchy Process* – desenvolvido por Saaty (1991) por volta de 1970 – apresenta características especialmente direcionadas à superação das limitações cognitivas dos decisores. O método é um instrumento de apoio à decisão conhecido pela sua simplicidade e robustez. Sua aplicação é feita em duas fases: a de construção da hierarquia e a de avaliação. Permite avaliar simultaneamente atributos quantitativos e qualitativos, além de incorporar a experiência e preferência dos tomadores de decisão (Saaty, 1991).

O método MACBETH é uma abordagem de apoio à tomada de decisão que permite avaliar opções tendo em conta múltiplos critérios. A distinção entre MACBETH e outros métodos de análise de decisão com múltiplos critérios é que MACBETH requer apenas julgamentos qualitativos sobre as diferenças de atratividade entre os elementos, para gerar pontuações para as opções em cada critério e somente para ponderar os critérios, quando se achar necessário. Sete categorias semânticas de diferença de atratividade são introduzidas em MACBETH: diferença de atratividade nula, muito fraca, fraca, moderada, forte, muito forte e extrema. A partir disso que se construiu o nome MACBETH, sigla que corresponde a “*Measuring, Attractiveness by a Category Based Evolution Technique*” - Medição de Atratividade baseado por uma técnica de avaliação de categoria.

Após uma abordagem dos modelos multicritérios, verificam-se diferentes técnicas de se avaliar um problema de decisão que podem resultar em soluções diferentes quando aplicados a um mesmo problema. Essas diferenças podem ser causadas por questões, como: diferentes formas de inserir as preferências, sequências distintas na introdução das preferências, definição inadequada do problema, aplicação de método inadequado ao problema em questão, enfim uma série de fatores

que pode prejudicar o resultado final que se deseja alcançar. Segundo Romero (2006), as diferenças entre os resultados obtidos para um determinado problema devem estar dentro de um limite aceitável.

De acordo com Salomon (2004), devido à sua ampla utilização no Brasil, os métodos AHP e MACBETH e os métodos da família ELECTRE são tratados neste trabalho como “métodos tradicionais” de MCDA. O AHP se trata de um método da Escola Americana; os métodos da família ELECTRE pertencem à Escola Europeia de MCDA; já o MACBETH possui elementos de ambas as escolas, como, por exemplo, agregação (Escola Americana) e subordinação (Escola Europeia).

Destaca-se que, para a solução do problema levantado nessa pesquisa, será utilizado o MACBETH como modelo multicritério. A escolha do método MACBETH deve-se a dois fatores principais, a saber:

- permite a transformação de avaliações qualitativas em quantitativas;
- não permite nenhum grau de inconsistência nos julgamentos do decisor, estabelecendo um processo interativo de revisão dos julgamentos, inclusive sugerindo quais os que devem ser revistos.

2.2. Descrição do Método MACBETH

De acordo com Mello *et. al.* (2002), na resolução do presente problema multicritério existem duas questões essenciais, a saber:

- determinar uma escala de valores, para cada critério, ou seja, atribuir notas a cada alternativa;
- agregar as “notas” de cada alternativa relativas a cada critério em uma nota única, por meio de uma soma ponderada. O problema consiste na atribuição de pesos aos vários critérios, respeitando as opiniões dos decisores.

Estes dois problemas podem ser resolvidos com o auxílio do método MACBETH (Bana e Costa & Vansnick, 1994). Para o primeiro, é usado o módulo “scores” do programa MACBETH. Este módulo permite atribuir notas a cada alternativa através de uma comparação pareada. Dadas duas alternativas, o decisor deve dizer qual a mais atrativa (tem maior nota) e qual o grau desta atratividade em uma escala semântica que tem correspondência com uma escala ordinal. O próprio programa faz a análise de coerência cardinal (transitividade) e semântica (relações entre as

diferenças), sugerindo, em caso de incoerência, como resolvê-la. Por programação linear são sugeridos uma escala de notas e os intervalos em que elas podem variar sem tornar o problema inconsistente (PPL inviável). É ainda facultado ao decisor ajustar graficamente o valor das notas atribuídas, dentro dos intervalos permitidos. Segundo Bana e Costa & Vansnick (1997), somente após este ajuste, com a introdução dos conhecimentos dos especialistas, é que fica caracterizada a construção da escala cardinal de valores.

Para solucionar o segundo problema apontado (atribuição de pesos e construção da função que conduz ao critério síntese), utilizou-se o módulo “*weights*” do programa MACBETH, que atua de maneira semelhante ao módulo “*scores*”. Ao contrário do método AHP que compara a importância dos critérios diretamente, o MACBETH faz a comparação de forma indireta, considerando alternativas fictícias que representam cada um dos critérios. A alternativa fictícia a_j representa o critério j quando apresenta a melhor nota em j e a pior em todos os outros critérios. É ainda introduzida uma ação, correspondente a um critério artificial, com a pior nota em todos os critérios, com a finalidade de evitar que um critério real tenha peso nulo. A eventual atribuição de peso zero a um critério relevante violaria o axioma da exaustão (Roy e Bouyssou, 1993). Através da comparação da atratividade das alternativas são atribuídos os pesos aos critérios de forma análoga ao procedimento realizado no módulo “*scores*”.

A principal diferença entre os dois módulos é que, enquanto no “*scores*” há a restrição de as notas ocuparem todo o intervalo definido, no “*weights*” o peso menor ocupa o valor mais baixo da escala, mas em vez de fixar o valor do maior peso obriga a que a soma de todos os pesos seja igual à unidade (Mello et. al., 2002).

2.3. Diferença de Atratividade

No método MACBETH, quando ao decisor forem solicitados julgamentos de valor sobre as ações potenciais (alternativas) em uma determinada situação, ele o fará em termos da atratividade que sente por esta alternativa. Esta tarefa é definida (Bana e Costa & Vansnick, 1995) como a construção de uma função-critério v_j , tal que:

- para $a, b \in A$, $v(a) > v(b)$ se, e somente se, para o avaliador a é mais atrativa (localmente) que b ($a P_b$);

- qualquer diferença positiva $v(a) > v(b)$ representa numericamente a diferença de valor entre **a** e **b**, com a P_b sempre em termos de um ponto de vista fundamental j (PVF_j), ou critério j .

Assim, para **a**, **b**, **c**, **d** $\in A$ com **a** mais atrativa que **b** e **c** mais atrativa que **d**, se verifica que $v(a) - v(b) > v(c) - v(d)$ se, e somente se, “a diferença de atratividade entre **a** e **b** é maior que a diferença de atratividade entre **c** e **d**”.

Dados os impactos $i_j(a)$ e $i_j(b)$ de duas ações potenciais **a** e **b** de uma dada opção, segundo um ponto de vista fundamental PVF_j , sendo **a** julgada mais atrativa que **b**, a questão fundamental neste método é estabelecer se a diferença de atratividade entre **a** e **b** é “extrema”, “muito forte”, “forte”, “moderada”, “fraca”, “muito fraca” ou “nula” (Bana e Costa & Vansnick, 1995).

É introduzida uma escala semântica formada por categorias de diferença de atratividade, com o objetivo de facilitar a interação entre o decisor e o analista. O decisor deverá escolher uma, e somente uma, entre as categorias apresentadas.

Segundo Mello *et. al.* (2002), se por um lado, o método MACBETH introduz um intervalo da reta real associado a cada uma das categorias, por outro lado, este intervalo não é fixado a priori, sendo determinado simultaneamente com a escala numérica de valor **v** que está sendo procurada.

Assim, este método liga-se ao problema teórico de representação numérica de semi-ordens múltiplas por limiares constantes de Doignon (1987), representado por **m** relações binárias ($P^{(1)}$, $P^{(2)}$, ..., $P^{(k)}$, ..., $P^{(m)}$), onde $P^{(k)}$ representa a relação de preferência tanto mais forte quanto maior é **k**, dado um critério j .

Para Bana e Costa & Vansnick (1995), as preferências são representadas por uma função **v** e por funções limiares s_k : a $P_b^{(k)}$, $s_k < v(a) - v(b) < s_{k+1}$, ou seja, é possível representar numericamente categorias semânticas de diferença de atratividade através de um intervalo de números reais.

Ainda de acordo com Bana, Costa e Vansnick (1995), não há restrição ao número de categorias semânticas a ser utilizado. No entanto, uma pessoa é capaz de avaliar, simultaneamente, um número limitado de classes quando da expressão de um juízo absoluto de valor, sendo algo em torno de sete fatores.

No MACBETH, a expressão dos julgamentos do decisor é feita por uma escala semântica formada por seis categorias, de dimensão não necessariamente igual:

- C1 diferença de atratividade muito fraca → $C1=[s1, s2]$ e $s1=0$;
- C2 diferença de atratividade fraca → $C2=]s2, s3]$;
- C3 diferença de atratividade moderada → $C3=]s3, s4]$;
- C4 diferença de atratividade forte → $C4=]s4, s5]$;
- C5 diferença de atratividade muito forte → $C5=]s5, s6]$;
- C6 diferença de atratividade extrema → $C6=]s6, +[$.

As categorias são delimitadas por limiares constantes s_1, \dots, s_6 , determinados simultaneamente à obtenção da escala de valor v .

2.4. Matriz de Juízos de Valor

Bana e Costa & Vansnick (1995) propõem a construção de matrizes de juízos de valor para facilitar a expressão dos julgamentos absolutos de diferença de atratividade entre os pares de alternativas. A Figura 1 mostra a matriz triangular superior construída para cada critério, na qual se supõe que $A = \{a_n, a_{n-1}, \dots, a_1\}$ é o conjunto de n alternativas a avaliar, e que estas estão ordenadas por ordem decrescente de atratividade $a_n \succ a_{n-1} \succ \dots \succ a_1$, não existindo indiferença em nenhum caso para este critério.

	a_n	a_{n-1}	...	...	a_2	a_1
a_n		$X_{n, n-1}$	...	...	$X_{n, 2}$	$X_{n, 1}$
a_{n-1}$			...	...	X_{n-1, 2}$	$X_{n-1, 1}$
...			
...				
a_2						$X_{2, 1}$
a_1						

Figura 1. Matriz de juízos de valor para avaliação local das ações

Fonte: Adaptada de Mello *et al.* (2002)

Cada elemento x_{ij} da matriz toma o valor k ($k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) se o decisor julgar que a diferença de atratividade do par (a_i, a_j) pertence à categoria C_k . Estes números não têm significado matemático; servem apenas como indicadores semânticos de qual categoria de diferença de atratividade foram atribuídos ao par respectivo.

2.5. Inconsistência nos Julgamentos de Valor

Mello *et al.* (2002) comentam que nos casos em que as matrizes de valor são grandes, a avaliação de todas as alternativas de maneira coerente torna-se difícil. Nestes casos, é comum o aparecimento de inconsistências nos julgamentos de valor do decisor. Comentam ainda que há dois tipos de inconsistências: semântica (quando a atribuição de categoria de diferença de atratividade a um par de alternativas não é logicamente aceitável) e cardinal (se a representação dos julgamentos não é possível através de uma escala cardinal dentro dos números reais).

Cabe destacar que o que se deseja é que a diferença de valor entre as alternativas seja um número compreendido entre os valores absolutos s_k e s_{k+1} . Uma vez que a diferença de atratividade entre duas alternativas é, por exemplo, forte, isto não significa que a amplitude da categoria C_4 é grande, mas sim que os valores absolutos dos limiares desta categoria são elevados (Mello *et al.* 2002).

2.6. Formulação

Segundo Bana e Costa & Vansnick, (1995), matematicamente, o método MACBETH é constituído por quatro problemas de programação linear (PPLs) sequenciais que realizam a análise de consistência cardinal, a construção da escala de valor cardinal e revelam fontes de inconsistência.

1º PPL

O 1º PPL verifica a existência de inconsistências cardinais. Matematicamente é representado por (I):

Min c

sujeito a

$$r_0) s_1, \dots, s_6 \geq 0; v(a) \geq 0, \forall a \in A; c \geq 0$$

$$r_1) s_1 = 0$$

$$r_2) v(a_1) = 0, \text{ onde } \forall a \in A, \text{ vale a } P_{a_1}$$

$$r_3) k = \{2, \dots, 6\}: s_k - s_{k-1} \geq 1000$$

$$r_4) k = \{1, \dots, 6\}, (a, b) \in C_k: v(a) - v(b) \geq s_k + 1 - c$$

$$r_5) k = \{1, \dots, 5\}, (a, b) \in C_k: v(a) - v(b) \leq s_{k+1} - 1 + c$$

A Função Objetivo (FO) é a minimização da variável auxiliar c , cuja utilidade é verificar se há inconsistência nos julgamentos do decisor (para $c = 0$, não há inconsistências).

Segundo Bana e Costa & Vansnick, (1995), tem-se que:

- A restrição r_0 garante a condição de não negatividade para todas as variáveis do problema. As restrições r_1 e r_2 fixam uma origem para a escala, garantindo que o limiar inferior da categoria de diferença de atratividade C_1 e o valor da alternativa menos atrativa sejam iguais a zero. O conjunto de restrições r_3 estabelece que o tamanho mínimo de cada categoria seja igual a 1000 unidades, valor arbitrário escolhido de maneira a que o erro introduzido nas duas restrições seguintes não tenha um valor significativo;
- As restrições r_4 e r_5 são a aplicação da fórmula de Doignon para o problema de semi-ordens múltiplas: $a \succ P(k) b, s_k < v(a) - v(b) < s_{k+1}$, ou seja, para cada par de alternativas deve-se garantir que a diferença de valor esteja entre os limites da categoria de diferença de atratividade que lhes foi atribuída. De maneira a ser possível a utilização de programação linear, a equação acima foi transformada em duas, representadas pelas restrições r_4 e r_5 . Como em programação linear não é possível a utilização de desigualdades estritas, foi incluída uma constante, com o valor de uma unidade, fazendo com que a condição teórica seja respeitada;
- Quando há inconsistências cardinais, o problema de representação numérica de semi-ordens múltiplas não tem solução. Com a introdução da variável c , o PPL (I) tem sempre solução, ou seja, sempre irá produzir uma escala que represente os julgamentos de valor do decisor. Quando o valor da FO for diferente de zero ($c \neq 0$) há inconsistências, ou seja, a escala não representa fielmente os julgamentos do decisor.

2º PPL

Para Bana e Costa & Vansnick, (1995), o 2º PPL é responsável pela construção da escala de valor cardinal que representa o conjunto de julgamentos do decisor. É representado pelo PPL (II).

$$\text{Min } \{\Sigma [\varepsilon(a, b) + \eta(a, b)] + \Sigma[\alpha(a, b) + \delta(a, b)]\}$$

$$r_0) s_1, \dots, s_6 \geq 0; v(a) \geq 0, \forall a \in A; c \geq 0$$

$$r_1) s_1 = 0$$

$$r_2) v(a_1) = 0, \text{ onde } \forall a \in A, \text{ vale a } P_{a_1}$$

$$r_3) k = \{2, \dots, 6\}: s_k - s_{k-1} \geq 1000 \quad (\text{II})$$

$$r_4) k = \{1, \dots, 6\}, (a, b) \in C_k: v(a) - v(b) \geq s_{k+1}$$

$$r_5) k = \{1, \dots, 5\}, (a, b) \in C_k: v(a) - v(b) \leq s_{k+1} - 1$$

$$r_6) k = \{1, \dots, 5\}, (a, b) \in C_k: v(a) - v(b) = 0.5(s_k + s_{k+1}) + \varepsilon(a, b) - \eta(a, b)$$

$$r_7) (a, b) \in C_6: v(a) - v(b) = s_6 + 1 - \alpha(a, b) + \delta(a, b)$$

O problema da representação numérica de semiordens por limiares constantes, quando construído conforme o método MACBETH, admite infinitas soluções. O critério adotado por Bana e Costa & Vansnick (1995) para a escolha da solução é a minimização dos desvios absolutos entre a diferença de valor de duas alternativas ($v(a) - v(b)$) e o ponto médio da categoria de diferença de atratividade à qual pertencem ($0,5*(s_{k+1} + s_k)$), para $k \neq 6$. Para a categoria C_6 , o critério escolhido foi a minimização dos desvios absolutos entre a diferença de valor das alternativas e o ponto s_{6+1} . A FO de (II) é, portanto, a minimização da soma dos desvios absolutos.

Para Bana e Costa & Vansnick, (1995), tem-se que:

- a restrição r_0 garante a condição de não negatividade para todas as variáveis do problema. As restrições r_1 , r_2 e r_3 são iguais às do PPL (I). As restrições r_4 e r_5 , da mesma forma, são similares àquelas já apresentadas, apenas não havendo necessidade de incluir a variável auxiliar c , uma vez que todas as fontes de inconsistência já foram analisadas;
- a restrição r_6 faz com que a diferença de valor entre o par (a, b) seja igual ao valor central da categoria de diferença de atratividade à qual pertencem, acrescido de um desvio absoluto. Esta restrição é aplicada a todos os pares de alternativas pertencentes à C_k com $k = 1$ a 5 . Para os pares que possuem diferença de atratividade extrema, ou seja, $k = 6$, a restrição r_7 faz com que a diferença de valor entre o par de alternativas seja igual ao limiar inferior da categoria mais uma unidade, mais o desvio absoluto. Ou seja, procura fazer com a diferença de valor entre pares de alternativas

que pertençam à categoria C_6 esteja o mais próximo possível do limiar inferior desta categoria.

3º e 4º PPL

Segundo Bana e Costa & Vansnick, (1995), quando no PPL (I) c é diferente de zero, há inconsistências nos julgamentos de valor do decisor. O procedimento mais adequado é uma revisão dos juízos iniciais, discutindo com decisor possíveis modificações para tentar ultrapassar problemas de inconsistência. Os PPLs (III) e (IV) evidenciam as possíveis causas de inconsistência. Apresentam a mesma FO, diferindo apenas nas restrições.

$$\text{Min } \{\Sigma[\alpha(a, b) + \beta(a, b)]\}$$

$$r_0) s_1, \dots, s_6 \geq 0; v(a) \geq 0, \forall a \in A; c \geq 0$$

$$r_1) s_1 = 0$$

$$r_2) v(a_1) = 0, \text{ onde } \forall a \in A, \text{ vale a } P_{a1} \quad \text{(III)}$$

$$r_3) k = \{2, \dots, 6\}: s_k - s_{k-1} \geq 1000$$

$$r_4) k = \{1, \dots, 6\}, (a, b) \in C_k: v(a) - v(b) \geq s_{k+1}$$

$$r_5) k = \{1, \dots, 5\}, (a, b) \in C_k: v(a) - v(b) \leq s_{k+1} - 1$$

$$r_6) k = \{1, \dots, 6\}, (a, b) \in C_k: v(a) - v(b) = s_{k+1} - \alpha(a, b) + \delta(a, b)$$

$$r_7) k = \{1, \dots, 5\}, (a, b) \in C_k: v(a) - v(b) = s_{k+1} - 1 + \beta(a, b) - \gamma(a, b)$$

$$\text{Min } \{\Sigma[\alpha(a, b) + \beta(a, b)]\}$$

$$r_0) s_1, \dots, s_6 \geq 0; v(a) \geq 0, \forall a \in A; c \geq 0$$

$$r_1) s_1 = 0$$

$$r_2) v(a_1) = 0, \text{ onde } \forall a \in A, \text{ vale a } P_{a1} \quad \text{(IV)}$$

$$r_3) k = \{2, \dots, 6\}: s_k - s_{k-1} \geq 1000$$

$$r_6) k = \{1, \dots, 6\}, (a, b) \in C_k: v(a) - v(b) = s_{k+1} - \alpha(a, b) + \delta(a, b)$$

$$r_7) k = \{1, \dots, 5\}, (a, b) \in C_k: v(a) - v(b) = s_{k+1} - 1 + \beta(a, b) - \gamma(a, b)$$

A FO minimiza a soma das variáveis $\alpha(a, b)$ e $\beta(a, b)$, fazendo ressaltar em (III) e em (IV) pares de alternativas cuja identificação com as categorias respectivas especificadas pelo decisor introduz problemas de inconsistência. Ou seja, aqueles para os quais os valores de $\alpha(a, b)$ ou de $\beta(a, b)$ são diferentes de zero na solução ótima de (III) ou (IV). Como resultado, é sugerido ao decisor uma matriz alterada que leve à consistência (Bana e Costa & Vansnick, 1995).

A diferença entre as soluções ótimas destes dois problemas está no fato de restringirem (III) ou não (IV) as soluções possíveis a valores das variáveis $\alpha(a, b)$ e $\beta(a, b)$ não superiores ao valor de c , pela introdução (III) ou não (IV) das restrições r_4 e r_5 (Bana e Costa & Vansnick, 1995).

2.7. Determinação de pesos para os critérios

De posse dos julgamentos absolutos de valor segundo cada um dos critérios, é necessário a obtenção de informações de natureza intercritérios (representadas por constantes de escala, taxas de substituição ou pesos), para uma avaliação global das alternativas. No método MACBETH, cada critério é representado por uma alternativa fictícia que tenha a melhor avaliação possível nesse critério e a pior nos demais critérios (Bana e Costa & Vansnick, 1995).

Para que não sejam perdidas informações a respeito do critério considerado menos atrativo, deve-se introduzir na matriz de juízos de valor uma alternativa fictícia extra, que deve possuir o pior nível de impacto em todos os pontos de vista fundamentais. A inclusão desta alternativa evita que seja atribuído peso nulo a algum critério, o que violaria o axioma da exaustão de Roy (Roy e Bouyssou, 1993).

Com este conjunto de julgamentos, o método MACBETH é executado primeiramente para a verificação de eventuais inconsistências semânticas e cardinais e, posteriormente, para a determinação de uma escala de valor cardinal que represente os julgamentos de valor do decisor. Os PPLs são semelhantes aos anteriores, excetuando-se a restrição de normalização adicionada neste módulo (Bana e Costa & Vansnick, 1995).

2.8. O software M-MACBETH

Para a resolução da metodologia é utilizado o *software* M-Macbeth por proporcionar facilidades de eliminação de cálculos matemáticos que seriam feitos manualmente e de redução do tempo que se despenderia para efetuá-los, além de proporcionar a rápida construção de gráficos e figuras que facilitam a compreensão do problema e um estudo detalhado da influência de variação

dos julgamentos. No entanto, é importante conhecer o funcionamento deste software para a correta aplicação de suas ferramentas e interpretação dos resultados da avaliação, os quais devem ser questionados para identificar a adequação da escala gerada pelo software ao sistema de preferências do avaliador, uma vez que o software simplesmente trata os dados e informações que são a ele fornecidos e gera resultados de forma sintética e compreensível, permitindo uma análise mais simples.

2.9. Os Critérios Considerados na Análise de Vulnerabilidade e Respectivos Pesos

Conforme já estabelecido, a vulnerabilidade às mudanças climáticas é dada pela combinação de sensibilidade da infraestrutura com sua capacidade adaptativa. Assim sendo, foram estabelecidos critérios relativos à sensibilidade e à capacidade adaptativa. Cada um dos critérios contou com alguns pontos de vistas fundamentais (PVF), conforme metodologia MACBETH.

Os Quadros 1 e 2 apresentam critérios e pontos de vistas fundamentais relativos à Sensibilidade e à Capacidade Adaptativa, respectivamente.

Quadro 1. Critérios e PVF relativos à Sensibilidade

Critério	Pontos de Vista Fundamentais
Condições Técnicas da Rodovia	Tipo de Superfície IRI IGG Geometria Sinalização
Exposição	Presença em <i>hotspots</i> , segundo modelos e cenários.

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 2. Critérios e PVF relativos à Capacidade Adaptativa

Critério	Pontos de Vista Fundamentais
Localização	Unidade da Federação
Administração	Gestão
Tráfego	Volume Médio Diário

Fonte: Elaboração própria.

Para cada PVF, foram criados cinco níveis, cuja pontuação foi estabelecida a partir da entrevista com especialistas em infraestrutura rodoviária.

O Quadro 3 apresenta a pontuação para o critério exposição.

Quadro 3. Critério de Exposição – PVF Presença em *hotspots*

Nível	Descrição (Presença em ...)	Justificativa	Pontuação
1	... apenas um <i>hotspot</i> gerado pelo ensemble (HG/MC) - Rx1dayRCP4.5 OU Rx1dayRCP8.5 OU Tem7diasRCP4.5 OU Temp7diasRCP8.5	É pouco provável que a rodovia sofrerá algum impacto.	0
2	... apenas hotspots de PRECIPITAÇÃO gerados pelo ensemble (HG/MC) - Rx1dayRCP4.5 E Rx1dayRCP8.5	É provável que a rodovia sofrerá com a precipitação.	25
3	... apenas hotspots de TEMPERATURA gerados pelo ensemble (HG/MC) - Temp7diasRCP4.5 E Temp7diasRCP8.5	É provável que a rodovia sofrerá com a temperatura.	30
4	... hotspots de TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO gerados pelo ensemble (HG/MC) para um cenário - Rx1dayRCP4.5 E Temp7diasRCP4.5 OU Rx1dayRCP8.5 E Temp7diasRCP8.5	É provável que a rodovia sofrerá com temperatura e precipitação.	80
5	... hotspots de TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO gerados pelo ensemble (HG/MC) para os dois cenários - Rx1dayRCP4.5 e Temp7diasRCP4.5 E Rx1dayRCP8.5 e Temp7diasRCP8.5	É muito provável que a rodovia sofrerá com temperatura e precipitação.	100

Fonte: Elaboração própria.

Os Quadros 4 e 5 apresentam a pontuação para o critério Condições Técnicas da Rodovia.

Quadro 4. Critério de Condições Técnicas da Rodovia – PVF Tipo de Superfície

Nível	Descrição	Justificativa	Pontuação
1	Planejada	Projeto pode ser modificado.	0
2	Duplicada	Recebe maior atenção pelo gestor.	10
3	Em Obras de Duplicação	É possível interferir no projeto.	50
4	Em obras de Pavimentação	É possível interferir no projeto.	60
5	Pavimentada	Recebe menor atenção pelo gestor.	100

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 5. Critério de Condições Técnicas da Rodovia – PVF, IGG, IRI, Geometria e Sinalização

Nível	Descrição	Pontuação
1	Ótimo	0
2	Bom	25
3	Regular	50
4	Ruim	75
5	Péssimo	100

Fonte: Elaboração própria.

O Quadro 6 apresenta a pontuação para o critério Localização.

Quadro 6. Critério de Localização – PVF Unidade da Federação

Nível	Descrição	Justificativa	Pontuação
1	Estados com participação no PIB nacional superior a 30%. Apenas o Estado de SP se enquadra nessa definição.	Maior poder de resposta.	-10
2	Estados com participação no PIB nacional entre 8% e 30%. Apenas RJ e MG se enquadram nessa definição.	Grande poder de resposta.	0
3	Estados com participação no PIB nacional entre 4% e 8%. (RS/PR/SC/DF)	Relativo poder de resposta.	50
4	Estados com participação no PIB nacional entre 1% e 4%. (MS/MT/GO/ES/BA/PE/CE/MA/PA/AM)	Baixo poder de resposta.	100
5	Estados com participação no PIB nacional menor do que 1%. (RO/AC/RR/AP/TO/PI/RN/PB/AL/SE)	Poder de resposta insuficiente.	150

Fonte: Elaboração própria.

O Quadro 7 apresenta a pontuação para o critério Administração.

Quadro 7. Critério de Administração – PVF Gestão da Rodovia

Nível	Descrição	Justificativa	Pontuação
1	Concessão - “É aquela concedida por processo de transferência à iniciativa privada para exploração, cabendo à empresa vencedora da licitação, por prazo determinado, todos os trabalhos necessários para garantir as boas condições da estrada, além de proporcionar serviços adequados aos seus usuários contra a cobrança de pedágio, revertendo, ao final do período, a rodovia ao poder concedente, em perfeito estado de condição física operacional”	Maior poder de resposta.	0
2	Delegada para Concessão - É aquela a qual um determinado Município, Estado ou Distrito Federal, após celebração de convênio com o Ministério dos Transportes de acordo com a Lei 9.277/96, transfere à iniciativa privada para exploração, cabendo à empresa vencedora da licitação, por prazo determinado, todos os trabalhos necessários para garantir as boas condições da estrada além de proporcionar serviços adequados aos seus usuários contra a cobrança de pedágio, revertendo, ao final do período, a rodovia ao poder concedente, em perfeito estado de condição física operacional	Grande poder de resposta.	10
3	Administração Direta - É aquela cuja responsabilidade pelos programas de operação, manutenção, conservação, restauração e construção de rodovias está a cargo do DNIT	Relativo poder de resposta.	50
4	Rodovia Delegada - É aquela cuja responsabilidade pelos programas de operação, manutenção, conservação, restauração ou construção de rodovias foi transferida ao Município, Estado ou Distrito Federal através de convênio de delegação com o DNIT	Baixo poder de resposta.	75
5	Não é rodovia federal	Poder de resposta insuficiente.	100

Fonte: Elaboração própria.

O Quadro 8 apresenta a pontuação para o critério Tráfego.

Quadro 8. Critério de Tráfego – PVF Volume Médio Diário

Nível	Descrição (Presença em ...)	Justificativa	Pontuação
1	VMD > 40000	Maior poder de resposta.	0
2	20000 < VMD < 40000	Grande poder de resposta.	25
3	10000 < VMD < 20000	Relativo poder de resposta.	50
4	5000 < VMD < 10000	Baixo poder de resposta.	75
5	VMD < 5000	Poder de resposta insuficiente.	100

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, a metodologia foi aplicada para determinação das preferências entre os critérios e os PVF a fim de determinar o peso de cada um deles para a construção de um Índice de Vulnerabilidade aplicável aos trechos de rodovia analisados nos *hotspots*. O Quadro 9 apresenta a distribuição de pesos obtida.

Quadro 9. Distribuição de Pesos obtida pela Metodologia MACBETH

Critério	Peso
Exposição	36%
Condições Técnicas da Rodovia	12%
Administração	28%
Localização	20%
Tráfego	4%

Fonte: Elaboração própria.

Do Quadro 9, pode-se concluir que a Sensibilidade da Rodovia tem participação de 48% e a Capacidade Adaptativa tem 52% do valor do índice de Vulnerabilidade.

Cabe ressaltar que o Critério Condições Técnicas da Rodovia possui cinco Pontos de Vista Fundamentais, cujos pesos são apresentados no Quadro 10.

Quadro 10. Distribuição de Pesos para os PVF do critério Condições Técnicas da Rodovia

Pontos de Vista Fundamentais	Peso
Tipo de Superfície	6,0%
IGG	2,5%
IRI	2,0%
Geometria	1,0%
Sinalização	0,5%

Fonte: Elaboração própria.

2.10. Tratamento dos dados para aplicação dos critérios de vulnerabilidade

Para a aplicação dos critérios descritos no item 2.9, foi necessário o tratamento das informações de forma que pudessem ser utilizadas como dados alfanuméricos e visualizadas em mapas. Para tal, foram disponibilizados a base georreferenciada do SNV (março de 2015) e os dados alfanuméricos do SGP (período 2013/2014) pelo DNIT. A integração entre as duas bases se deu pelo código de referência dos trechos da Rede Rodoviária do Plano Nacional de Viação (PNV). Este código alfanumérico (com três letras e sete números) é o nível de divisão mais básico oferecido com informações georreferenciadas. Este sistema de referência é subdividido em subtrechos homogêneos que possuem características comuns quanto a condições de superfície, tipo de revestimento, geometria e intervalo de extensão entre 300m a 20km.

A seguir são especificados os tratamentos dos dados realizados para tipo de superfície, IGG e IRI, VMD, gestão, sinalização e geometria para aplicação dos critérios da avaliação da vulnerabilidade das rodovias inseridas nos hotspots.

Tipo de Superfície

A caracterização do tipo de superfície das rodovias consideradas no estudo utilizou a base de dados georreferenciada do DNIT, conforme apresentado no Produto 3. Utilizou-se como dado bruto a classificação de cada um dos seguimentos homogêneos rodoviários em função da “situação física das rodovias”. No entanto, foi preciso agregar outras classificações do DNIT, em função da capacidade de modificação/intervenção no projeto, conforme destacado no Quadro 4.

O Quadro 11 apresenta a correspondência entre os dados apresentados pelo DNIT e as classificações de níveis para o critério de condições técnicas da rodovia da avaliação de vulnerabilidade.

A terminologia adotada segue DNIT (2007), podendo ser assim definida:

PLANEJADA (PLA) – Rodovia que consta de um planejamento e cuja construção é esperada. Fisicamente são inexistentes, mas são previstos pontos de passagem que estabelecem uma diretriz destinada a atender uma demanda potencial de tráfego.

LEITO NATURAL (LEN) – Rodovia construída em primeira abertura, em terreno natural, sem atendimento às normas, podendo eventualmente receber revestimento primário. Rodovias que não atendem às normas rodoviárias de projeto geométrico, não se enquadrando, portanto, em nenhuma

das classes de rodovias estabelecidas pelo DNIT. Sua superfície de rolamento é o próprio terreno natural.

IMPLANTADA (IMP) – Rodovias construídas de acordo com as normas rodoviárias de projeto geométrico e que se enquadram em determinada classe estabelecida pelo DNIT. Apresentam superfície de rolamento sem pavimentação. Estas rodovias normalmente apresentam superfície em revestimento primário e permitem tráfego o ano todo.

PAVIMENTADA (PAV) – Rodovia com revestimento superior de pavimento asfáltico, de concreto cimento ou de alvenaria poliédrica.

DUPLICADA (DUP) – Formadas por duas pistas com duas ou mais faixas para cada sentido, separadas por canteiro central, por separador rígido ou ainda com traçados separados muitas vezes contornando obstáculos.

EM OBRAS DE IMPLANTAÇÃO (EOI) – Trechos de rodovia planejada ou em leito natural, nos quais estejam executando serviços de Implantação.

EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO (EOP) – Trechos de rodovia implantada em que se estejam executando serviços de Pavimentação, o trecho será designado como em obras de Pavimentação.

EM OBRAS DE DUPLICAÇÃO (EOD) – Trechos rodoviários pavimentados nos quais estejam sendo executados serviços de duplicação.

TRAVESSIA (TRV) – Travessias de cursos d'água – são trechos de transposição de rios em que não há ponte.

Quadro 11. Correspondência dos Critério de Condições Técnicas da Rodovia – PVF Tipo de Superfície

Nível	Ajuste para Análise de Vulnerabilidade	Classificação DNIT	Pontuação
1	Planejada	PLA - Planejada	0
2	Duplicada	DUP - Duplicada	10
3	Em Obras de Duplicação	EOD - Em Obras de Duplicação	50
4	Em obras de Pavimentação	EOP - Em obras de Pavimentação; EOI – Em Obras de Implantação; IMP - Implantada	60
5	Pavimentada/terra	PAV – Pavimentada; TRV – Travessia; LEN – Leito Natural	100

Fonte: Elaboração própria.

IRI e IGG

Uma das características funcionais mais importantes para se avaliar a qualidade do pavimento de estradas é a irregularidade longitudinal, o qual relaciona os elementos associados à boa funcionalidade. O IRI - International Roughness Index, ou Índice de Irregularidade Internacional, é um índice estatístico expresso em m/km muito utilizado para medir a irregularidade de pavimentos, permitindo quantificar os desvios da superfície do pavimento em relação a um referencial. O levantamento da irregularidade é realizado ao longo de uma linha imaginária, geralmente coincidente com as áreas de trilhas de roda. Por seu turno, o IGG - Índice de Gravidade Global, definido pela norma DNIT 006/2003-PRO, resulta da avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis, sendo obtido por intermédio do levantamento e classificação de ocorrências de defeitos aparentes na superfície do pavimento e na medida dos afundamentos nas trilhas de roda (Echeverria, 2011).

No presente estudo, a estimativa do IRI e IGG teve como base os dados de monitoramento do SGP (SNV, 2015). Os dados, são apresentados por quilômetro dos trechos monitorados e apresentam variações temporais para os anos de 2013 e 2014. Conforme especificado anteriormente, a compatibilização dos trechos apresentados pela base georreferenciada do SNV com os dados de monitoramento do SGP foi feita a partir do código de cada seguimento homogêneo de rodovia que é comum nas duas bases de dados.

Os dados de monitoramento dos indicadores IRI e IGG foram convertidos de uma escala com valores por quilômetros para segmentos homogêneos. Isso correu por exigência da base de dados georreferenciada, cujos vetores não foram projetados por quilômetro, mas por segmentos rodoviários com extensão variável. Neste sentido, a conversão se deu utilizando-se as médias do IGG

e do IRI para cada trecho de rodovia. Este procedimento facilitou a avaliação de vulnerabilidade para a escala nacional, uma vez que demandou menor esforço de processamento dos cálculos e permitiu a elaboração de mapas para a visualização das vulnerabilidades das rodovias. Por outro lado, como toda média, não ilustra os extremos de uma distribuição. Uma análise dos dados por quilômetros permite afirmar que os trechos possuem uma distribuição de frequência bem dispersa.

Além das diferenças de escala, menos da metade dos trechos do SNV destacados para o trabalho possuem dados de monitoramento de IGG e IRI (neste caso, inclui-se o VMD). Com efeito, a ausência de dados sobre estes trechos colabora para uma situação de maior vulnerabilidade, de acordo com a metodologia desenvolvida neste trabalho, quando comparados com os trechos monitorados. De forma conservadora, considerou-se que os trechos sem dados são equivalentes aos níveis de maior vulnerabilidade.

Outra limitação dos dados de monitoramento dos indicadores IRI e IGG está relacionada a ausência de informações sobre os trechos federais delegados aos governos estaduais e para a iniciativa privada. São trechos importantes, como todas as rodovias federais do estado de São Paulo e concessões, como a Via Dutra. Infelizmente, não se teve acesso aos dados sobre estes trechos rodoviários para o IRI e o IGG, gerando, assim, um viés na avaliação de vulnerabilidade, restando como recomendação futura uma integração de todas as bases de dados de monitoramento federais e estaduais, conforme será retomado nas recomendações.

As médias do IRI e IGG foram classificadas por trecho com base na Norma DNIT 006/2003 (DNIT, 2003) e na base DNIT (2006), respectivamente, conforme apresentado no Quadro 12.

Quadro 12. Correspondência dos critérios de Condições Técnicas da Rodovia – PVF IGG e IRI

Nível	Descrição	IGG	IRI
1	Ótimo	IGG < 20	IRI < 1,9
2	Bom	20 ≤ IGG < 40	1,9 ≤ IRI < 2,7
3	Regular	40 ≤ IGG < 80	2,7 ≤ IRI < 3,5
4	Ruim	80 ≤ IGG < 160	3,5 ≤ IRI < 4,6
5	Péssimo	IGG > 160 e sem informação	IRI > 4,6 e sem informação

Fonte: Elaboração própria com base em DNIT (2003 e 2006).

Geometria e Sinalização

A sinalização rodoviária é de fundamental importância para a segurança dos usuários das rodovias. A finalidade dos sinais de trânsito (sinalização vertical, sinalização horizontal, dispositivos auxiliares, sinalização semafórica, sinalização de obras e sinalização de gestos) é comunicar, aos

usuários das rodovias, normas, instruções e informações para a circulação correta e segura dos veículos. Para que seja eficaz, a sinalização deve atender a princípios norteadores de legalidade, suficiência, padronização, clareza, precisão, visibilidade, legibilidade, manutenção e conservação, o que requer adequada implantação e manutenção permanente.

As características geométricas das vias são definidas a partir de características espaciais, incluindo greides, quantidade e largura das faixas, acostamentos e curvas, entre outros elementos. Tais elementos, por seu turno, compõem as características básicas do projeto geométrico, a saber: alinhamento horizontal, alinhamento vertical e seção transversal (TRB, 2010 *apud* CNT, 2014). O alinhamento horizontal é o traçado da rodovia em planta, e o alinhamento vertical, o traçado em perfil, composto por trechos retos e em curva. A seção transversal, por seu turno, é definida pelos elementos largura da faixa e do acostamento, sarjetas e canteiro central, entre outros. Dessa forma, as características geométricas da via afetam as condições de segurança no que diz respeito à habilidade do motorista em manter o controle do veículo e identificar situações e características perigosas; existência de oportunidades de conflitos, tanto em relação à quantidade quanto ao tipo; consequências de uma saída de pista de um veículo desgovernado; e comportamento e atenção dos motoristas. A implantação de projetos geométricos inadequados resulta em acidentes, limitações da capacidade de tráfego da rodovia e no aumento dos custos operacionais (DNIT, 2010).

A ausência de informações mais específicas sobre sinalização e geometria na base do DNIT, conforme abordado no Produto 3, obrigou a utilização dos dados da Pesquisa CNT de Rodovias de 2014 (CNT, 2014). A pesquisa apresenta classificações qualitativas agregadas por tipo de rodovias. A adaptação ao recorte utilizado na avaliação de vulnerabilidade culminou numa aproximação, a partir de valores médios adotados pelo estudo.

Os valores dos segmentos homogêneos foram classificados em função da respectiva rodovia de inserção. A tipologia adotada, para efeito de avaliação de vulnerabilidade, foi a do CNT (2014), que considera as classes “péssimo”, “ruim”, “regular”, “bom” e “ótimo”.

Gestão

A caracterização do critério de administração dos segmentos homogêneos de rodovias também utilizou a base de georreferenciada de dados sobre o SNV do DNIT. No entanto, utilizou-se, como dado bruto, a classificação dos seguimentos em função das colunas “jurisdição” e “concessão”,

apresentada na tabela de atributos do arquivo enviado. Foi preciso agregar algumas classificações do DNIT, conforme destacado no Quadro 13.

Quadro 13. Correspondência do Critério de Administração – PVF Gestão da Rodovia

Nível	Ajuste para a Análise de Vulnerabilidade	Descrição DNIT
1	Concessão	Concessão Federal
2	Delegada para Concessão	Concessão Estadual
3	Administração Direta	Rodovia Federal
4	Rodovia Delegada	CV Av Brasil, DER 1.783/2004, CV 1078/2013, CV 12/22 CV 7/5, CV 3/96, CV 679/14, CV 23/4, CV 5/96
5	Não é rodovia federal.	Rodovia Estadual

Fonte: Elaboração própria.

VMD

Os dados de VMD, da mesma forma que o IGG e o IRI, foram retirados do SGP do DNIT. Apresentam as mesmas diferenças em termos de escala geográfica, temporal e de disponibilidade. Assim, todas as adequações realizadas para o IGG e IRI foram aplicadas ao VMD. Com o VMD tratado para cada segmento homogêneo de rodovia, foi utilizada a classificação apresentada no Quadro 8.

3. RESULTADOS

A avaliação da vulnerabilidade da infraestrutura rodoviária foi realizada com base em critérios de sensibilidade e capacidade adaptativa, cujo resultado final é expresso pelo Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária – IVIR.

No contexto da sensibilidade, o conjunto de Pontos de Vistas Fundamentais - PVF associados à exposição foi particularmente importante para a avaliação global da vulnerabilidade, alcançando Participação Relativa – PR de 36%, a maior, portanto, considerando a totalidade de critérios avaliados. Conforme salientado anteriormente, a exposição foi definida com base em *hotspots* climáticos, que sintetizam as regiões onde o limiar crítico de resistência da superfície do pavimento e da microdrenagem foram ultrapassados, tendo como referência os índices de extremo Temp7dias e RX1day. Para efeito de redução das incertezas associadas à modelagem climática, os diversos *hotspots* foram agrupados com base na técnica de *ensemble*, optando-se pela análise mais conservadora.

Assim, a avaliação da sensibilidade foi efetuada tendo como referência os PVF de condições técnicas, considerando o IRI, IGG, Geometria e Sinalização, totalizando 6% de PR, tipo de superfície (PR = 6%) e exposição (PR = 36%), alcançando o 48% de PR, na composição final do IVIR. A avaliação da capacidade administrativa, com PR igual a 52%, considerou aspectos administrativos (PR = 28%), de localização (PR = 20%) e condições de tráfego (PR = 4%).

A análise integrada dos conjuntos de critérios de sensibilidade (condições técnicas e exposição) e capacidade adaptativa (localização, gestão e volume de tráfego) deu origem ao Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária – IVIR, o qual foi calculado com base na seguinte equação:

$$\text{IVIR} = \text{SB} (\text{IGG} * 0,025 + \text{IRI} * 0,020 + \text{Sup} * 0,060 + \text{Geo} * 0,010 + \text{Sin} * 0,005) + \text{CA} (\text{Exp} * 0,360 + \text{Adm} * 0,280 + \text{Loc} * 0,200 + \text{Trf} * 0,040)$$

Onde:

IVIR - Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária

SB - Critérios de Sensibilidade

CA – Critérios de Capacidade Adaptativa

IGG – Índice de Gravidade Global

IRI – Índice de Irregularidade Internacional

Sup – Superfície

Geo – Geometria

Sin – Sinalização

Exp – Exposição

Loc - Localização

Adm – Administração

Trf – Tráfego (VMD)

Os resultados para os critérios de sensibilidade e capacidade adaptativa são, a seguir, apresentados em maior detalhe. No Item 3.2, são apresentados os resultados relativos ao IVIR.

3.1. Critérios

3.1.1. Sensibilidade

Exposição

As Figuras 2 a 6 apresentam a malha rodoviária associada aos cinco níveis de exposição determinados pelos diferentes tipos de agregação (*ensemble*) de *hotspots* de temperatura (Temp7dias) e precipitação (RX1day), dos modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5 (vide Quadro 3).

A Figura 2 representa a exposição definida pelo total da área dos *hotspots* de ambos os índices de extremos climáticos e respectivos cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5, mas que não se sobrepõe (N1). A Figura 3 traz a exposição definida pelo *ensemble* dos *hotspots* de precipitação, para RCP 4.5 e RCP 8.5 (N2). A Figura 4, por seu turno, apresenta a exposição definida pelos *ensembles* de *hotspots* de temperatura apenas, para os RCP 4.5 e RCP 8.5 (N3), ao passo que a Figura 5 traz o *ensemble* dos RCP4.5 e RCP 8.5, para temperatura e precipitação (N4). Por fim, a Figura 6 apresenta o *ensemble* que marca a interseção dos *hotspots* de temperatura e precipitação, para ambos os cenários de emissão (N5).

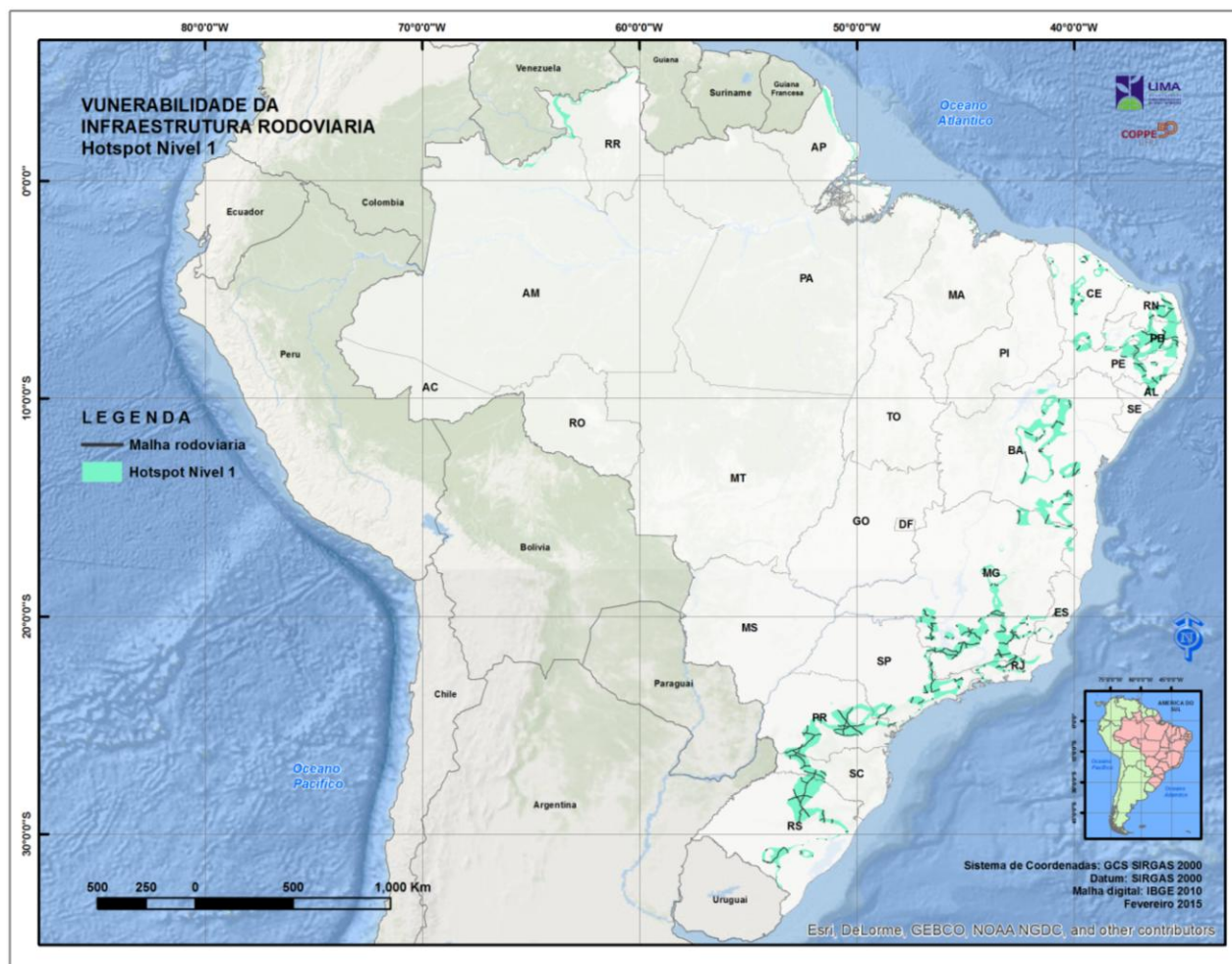


Figura 2. Malha rodoviária no *hotspot* Nível 1 (N1), definido pelo *ensemble* dos *hotspots* para Temp7dias e RX1day, dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, RCP 4.5 e RCP 8.5

Fonte: Elaboração própria

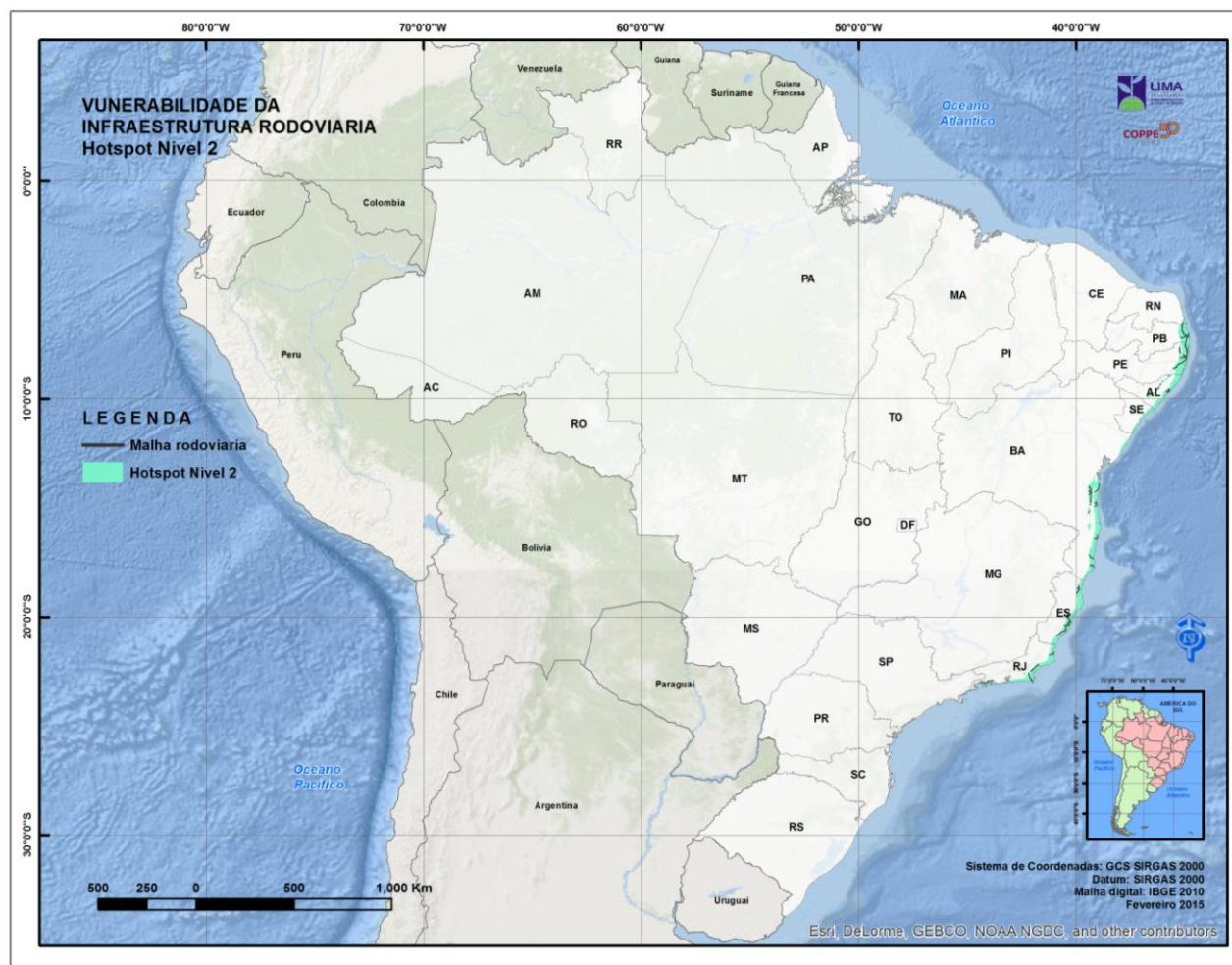


Figura 3. Malha rodoviária na *hotspot* Nível 2 (N2), definido pelo *ensemble* dos *hotspots* para RX1day, dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, RCP 4.5 e RCP 8.5

Fonte: Elaboração própria

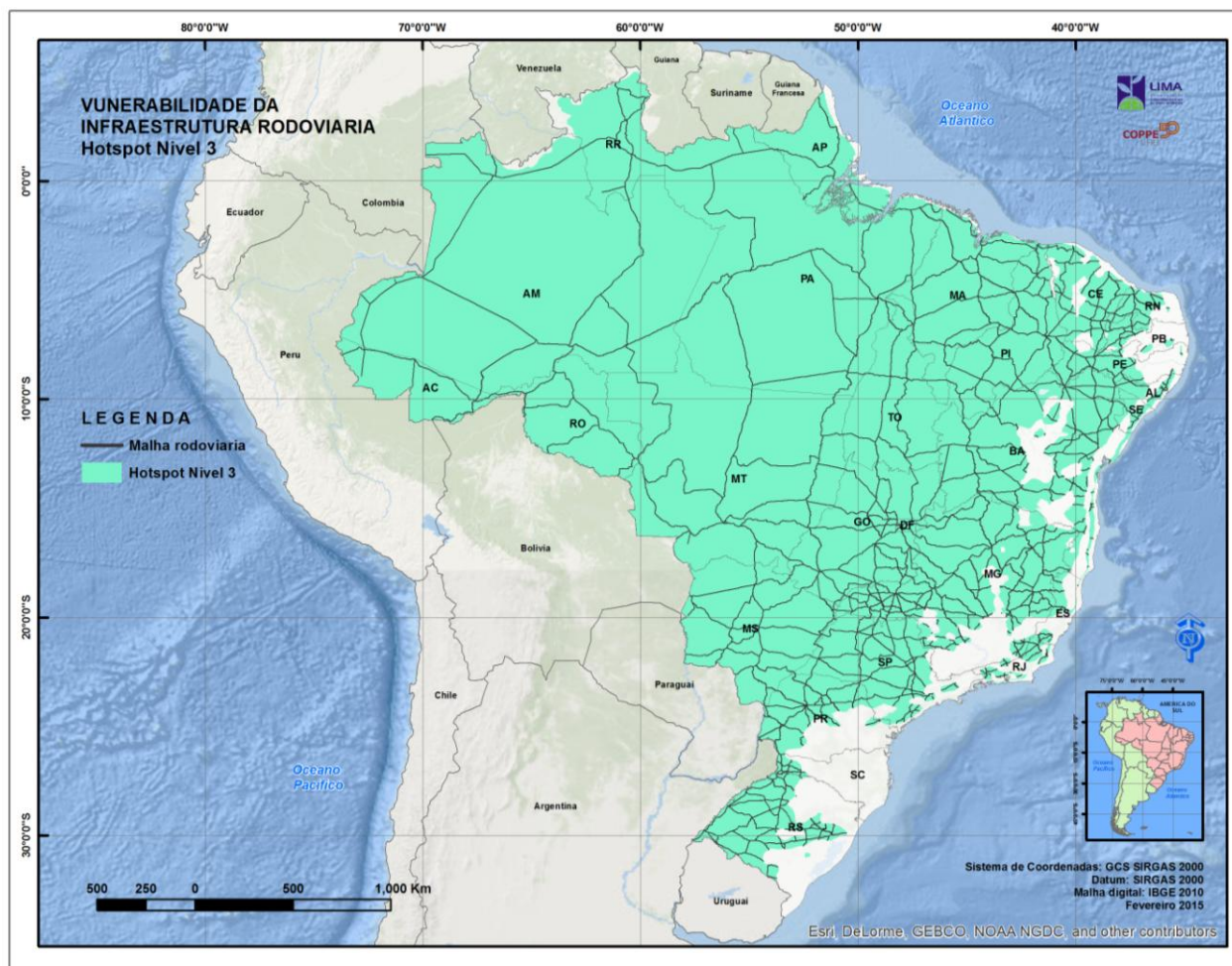


Figura 4. Malha rodoviária no hotspot Nível 3 (N3), definido pelo ensemble dos hotspots para Temp7dias, dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, RCP 4.5 e RCP 8.5

Fonte: Elaboração própria

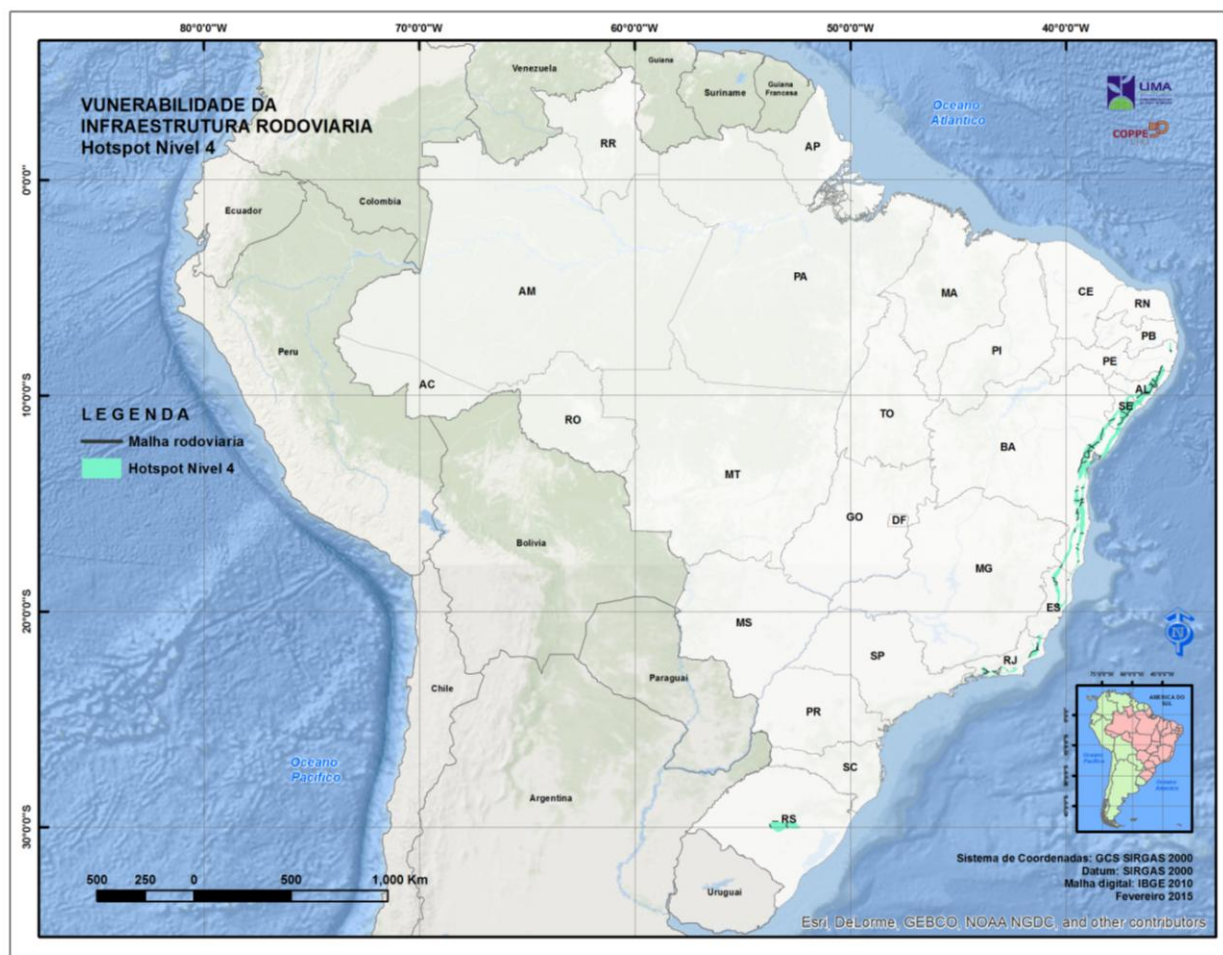


Figura 5. Malha rodoviária no hotspot Nível 4 (N4), definido pelo ensemble dos hotspots para Temp7dias e RX1day, dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, RCP 4.5 e RCP 8.5

Fonte: Elaboração própria

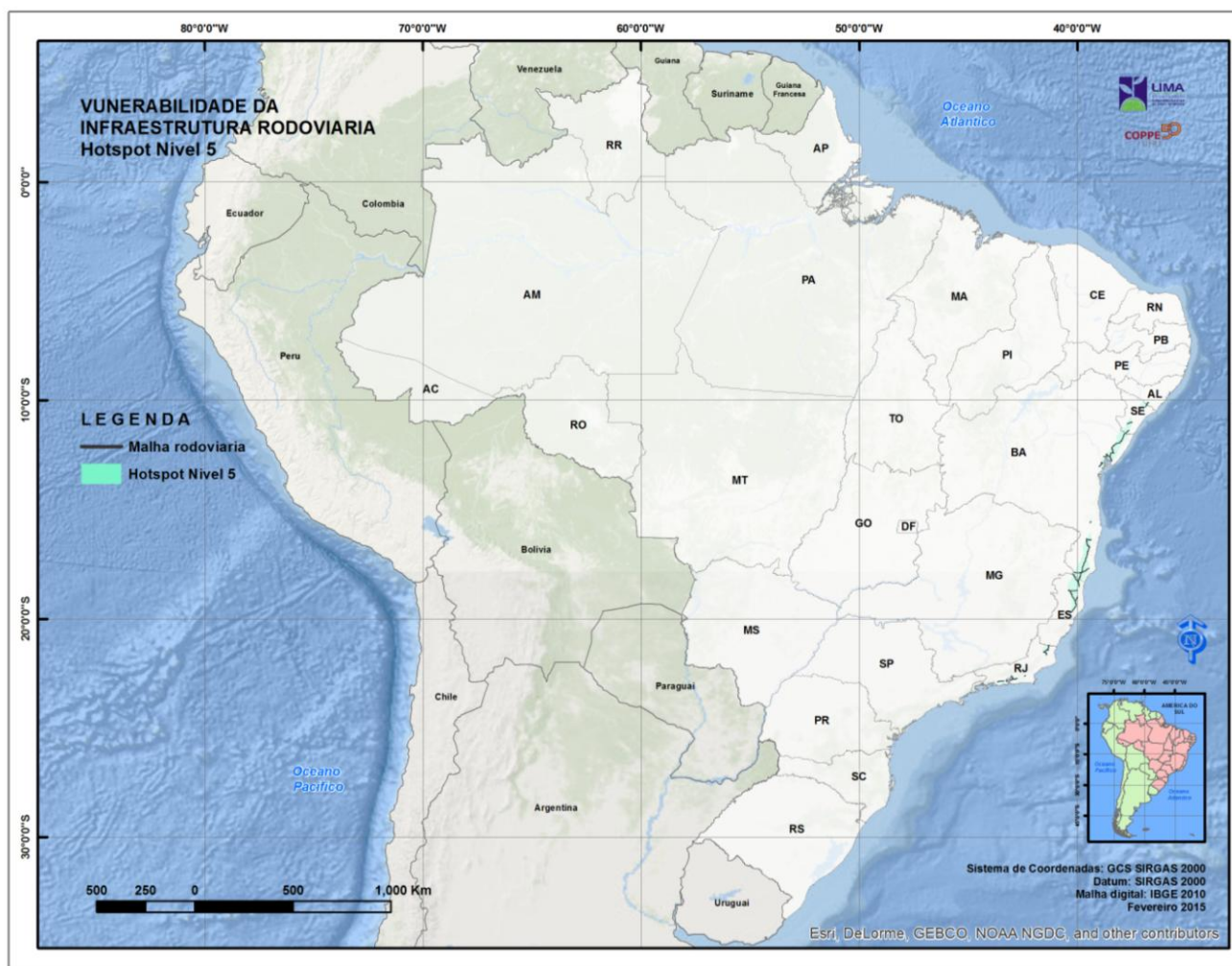


Figura 6. Malha rodoviária no *hotspot* Nível 5 (N5), definido pelo *ensemble* dos *hotspots* para Temp7dias e RX1day, dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, RCP 4.5 e RCP 8.5

Fonte: Elaboração própria

O Quadro 14 apresenta a síntese dos resultados para os cinco diferentes níveis de agregação de *hotspots* que determinam o fator exposição da malha rodoviária, considerando o percentual de abrangência no território nacional e situação geográfica, ao passo que o Quadro 15 sumaria a malha rodoviária por nível de exposição, com relação ao número de segmentos interceptados, extensão total e média da extensão.

Quadro 14. Abrangência espacial dos *hotspots* e percentual com relação a totalidade do território nacional e entre a totalidade da área dos *hotspots*

NIVEL	Abrangência territorial	% Brasil	% hotspots
N1	Padrão heterogêneo de abrangência espacial nos estados do CE, RN, PB, PE, AL, BA, MG, ES, RJ, SP, PR, SC e RS	3,6	3,8
N2	Faixa litorânea entre o sul do Rio Grande do Norte e centro-sul do Estado do Rio de Janeiro	0,6	0,6
N3	A quase totalidade das Região Norte, totalidade da Região Centro Oeste e extensas áreas das demais regiões	90,0	93,9
N4	Faixa litorânea entre o Estado de Pernambuco e centro-sul do Estado do Rio de Janeiro, assim como no <i>spot</i> localizado no centro-sul do Rio Grande do Sul	0,7	0,7
N5	Faixa estreita próxima ao litoral dos estados de AL, SE, BA, ES e RJ	1,0	1,0

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 15. Caracterização da malha rodoviária, segundo níveis de exposição

NIVEL	Número de segmentos	Extensão total	Média da extensão
N1	762	9345,0	12,3
N2	191	1507,0	7,9
N3	4961	99023,6	19,9
N4	288	2173,0	7,5
N5	133	1425,0	10,7

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com os resultados, foram observados três padrões de abrangência territorial de *ensemble* de *hotspots* no Brasil, considerando os dois índices de extremos climáticos utilizados para definir a vulnerabilidade da infraestrutura rodoviária. Assim, N2, N4 e N5 estão eminentemente associados à faixa litorânea das regiões Nordeste e Sudeste, ao passo que N3 configura o *ensemble* de *hotspot* mais extenso, abrangendo 90,0% do território nacional. O padrão espacial de N1 marca a região delimitada pela diferença de área dos *ensembles* de *hotspots* de Temp7dias para os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5, descontadas as áreas dos demais níveis de exposição que lhe intersectam.

N3, por sua extensa área, congrega o maior número de segmentos de rodovias (n = 4961), que somam mais de 99 mil km de extensão. No caso específico de N5, que esta está relacionado ao nível máximo de exposição, há 133 segmentos de rodovias, que somam cerca de 1400 km.

Condições Técnicas

As Figuras 7 a 11 apresentam a espacialização dos dados de condições técnicas (IRI, IGG, geometria, sinalização e tipo de superfície) da malha rodoviária.

A Figura 7 apresenta o IRI, que mede a irregularidade de pavimentos, permitindo quantificar os desvios da superfície do pavimento em relação a um referencial.

Na Figura 8, é apresentado o resultado para o IGG, que avalia a superfície de pavimentos flexíveis com base na ocorrência de defeitos aparentes na superfície e na medida dos afundamentos nas trilhas de roda.

A presente situação da Geometria e Sinalização é, na sequência, abordada nas Figuras 9 e 10, respectivamente, e, assim como para o IRI e IGG, refletem as condições atuais observadas para o universo de segmentos rodoviários analisados.

Por fim, a Figura 11 traz a presente condição da superfície do conjunto de segmentos rodoviários, considerada do ponto de vista da malha existente e planejada.

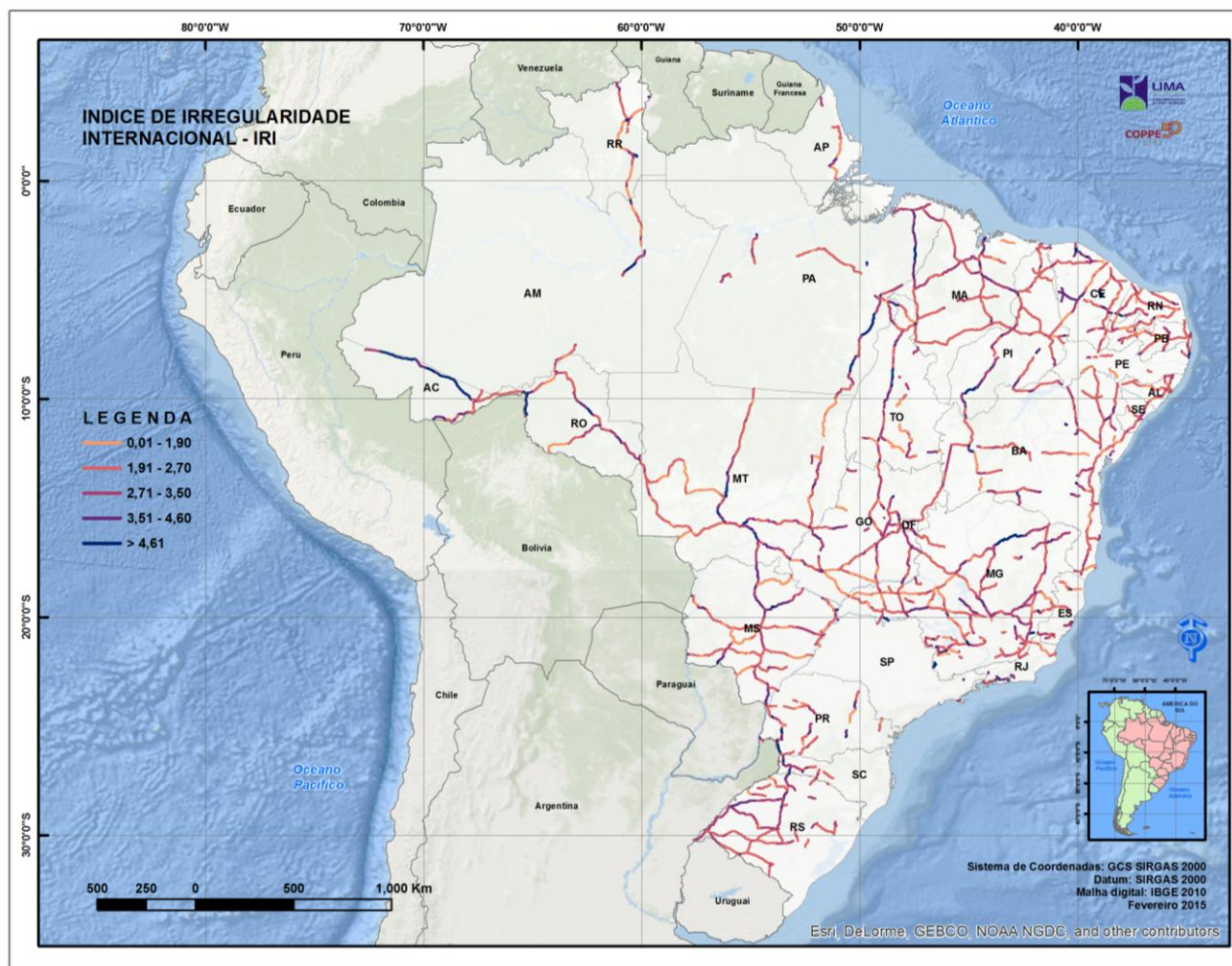


Figura 7. Índice de Irregularidade Internacional (IRI), para os segmentos de rodovia analisados

Fonte: Elaboração própria

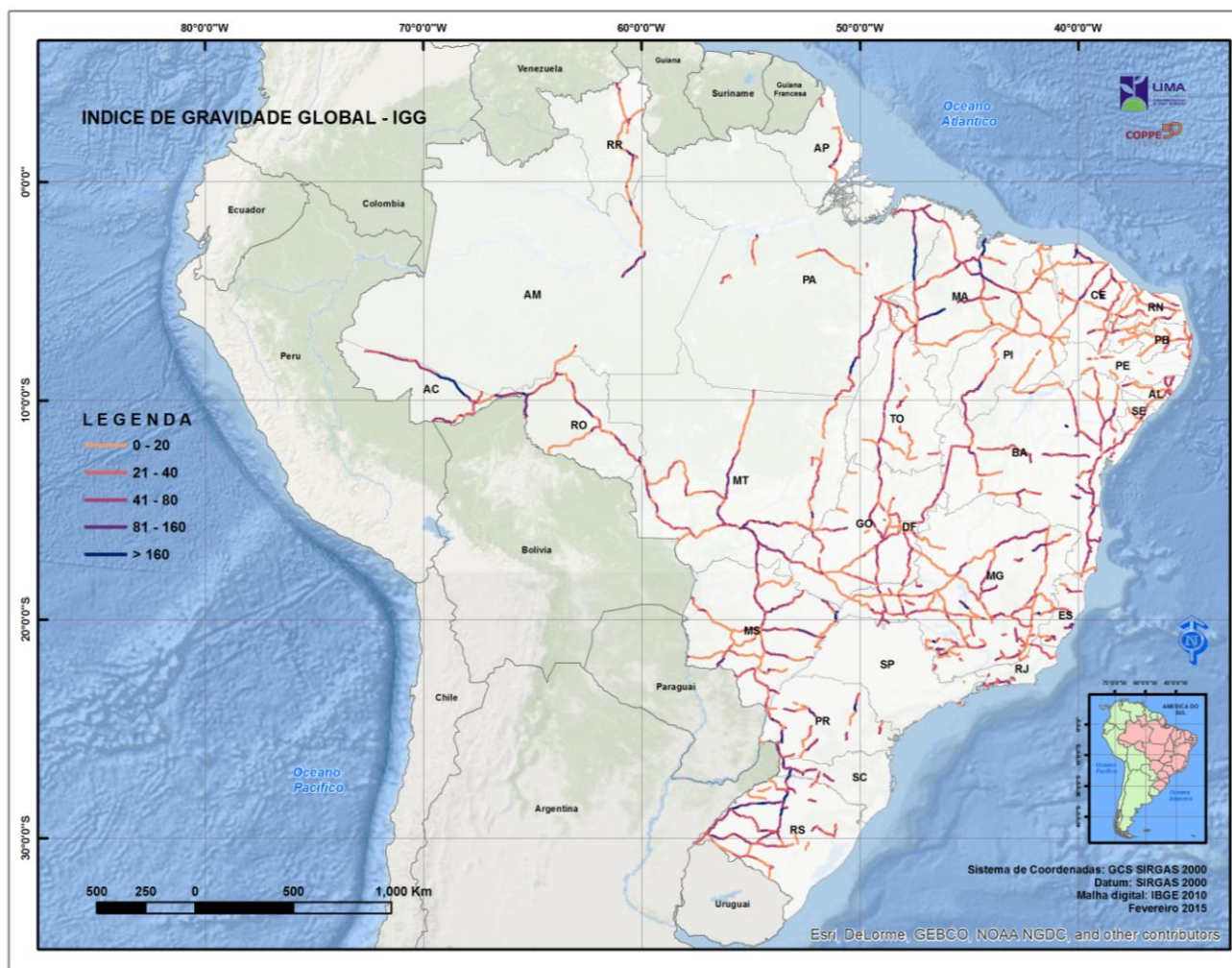


Figura 8. Índice de Gravidade Global (IGG), para os segmentos de rodovia analisados

Fonte: Elaboração própria

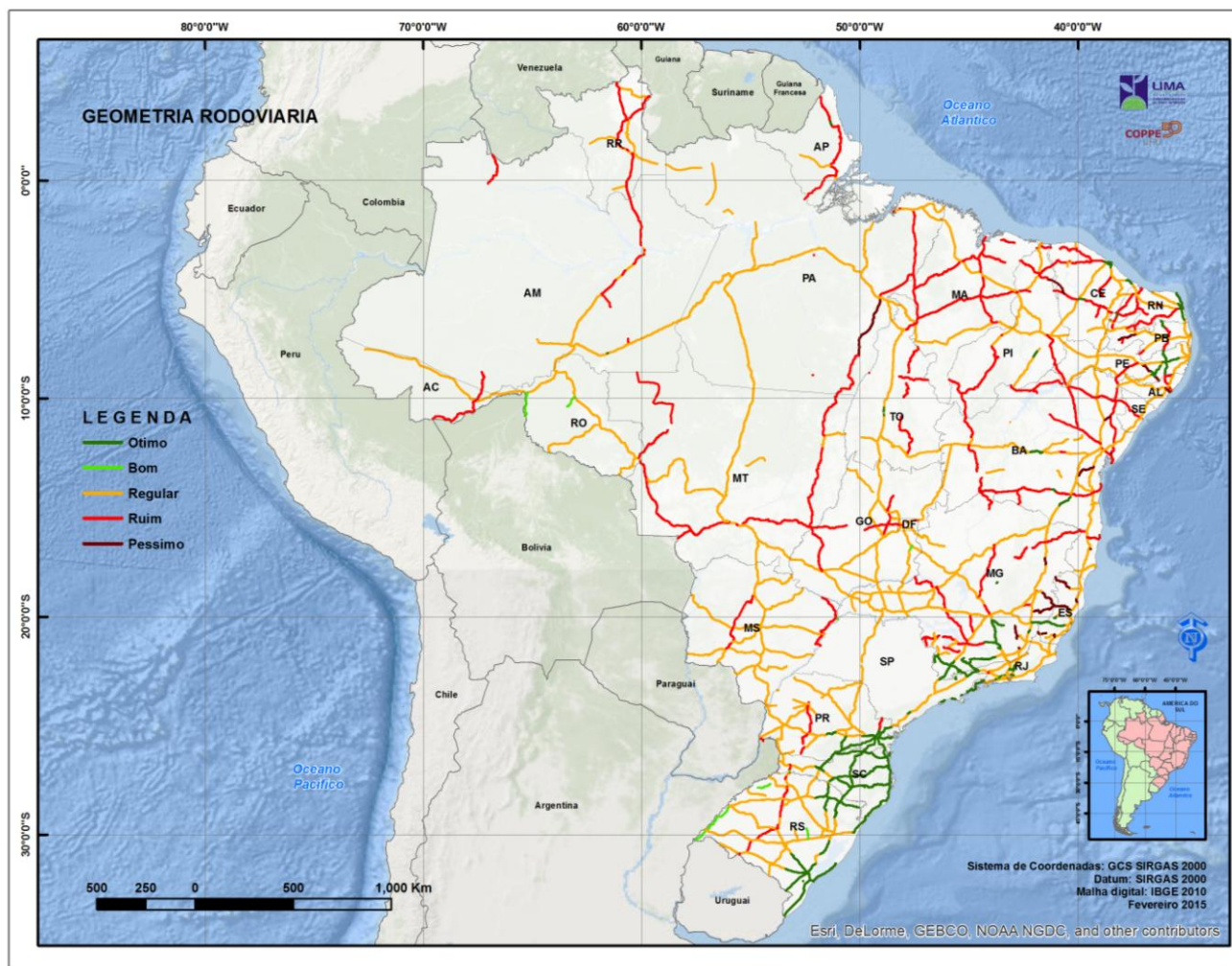


Figura 9. Classificação da Geometria para os segmentos de rodovia analisados

Fonte: Elaboração própria

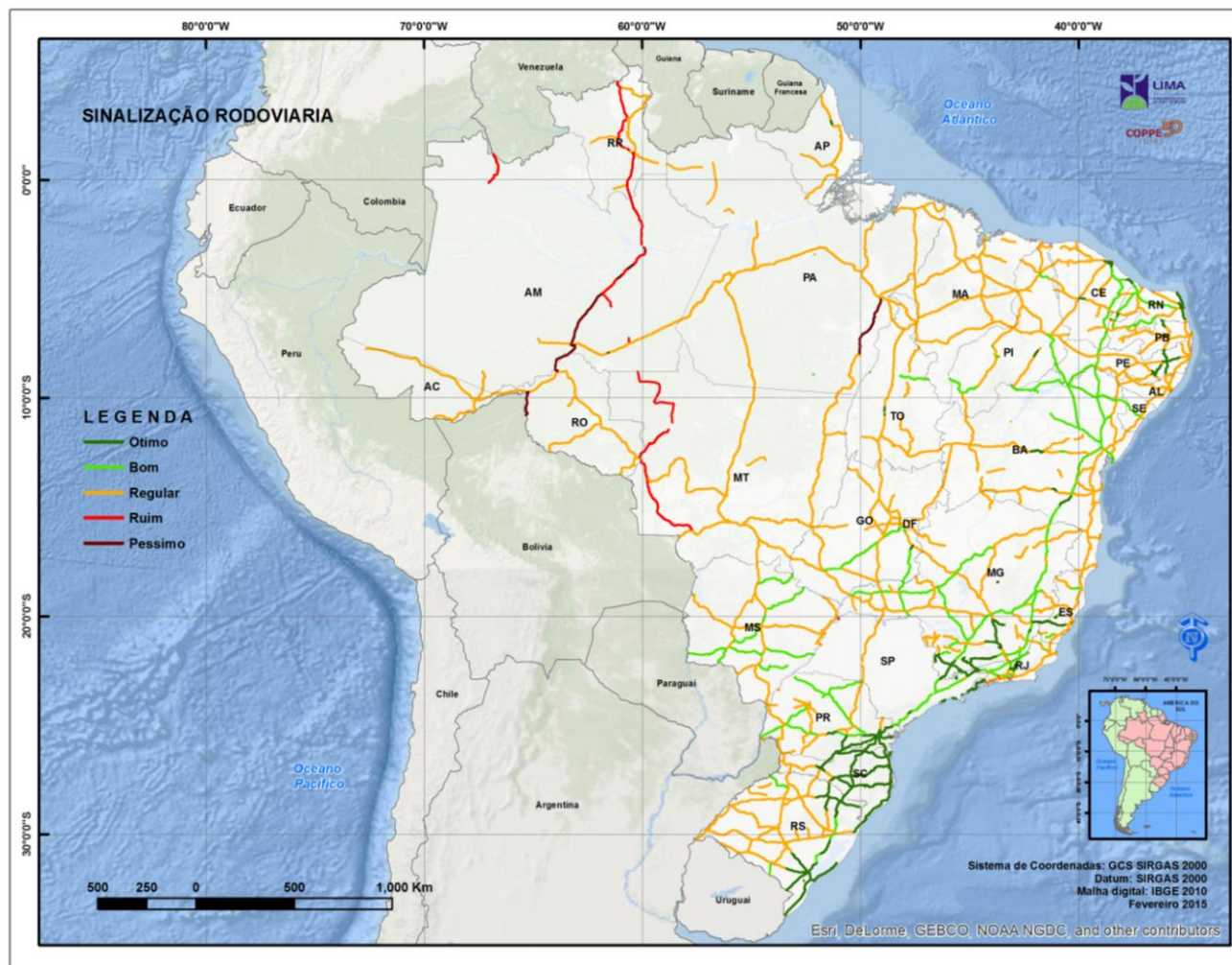


Figura 10. Classificação da Sinalização para os segmentos de rodovia analisados

Fonte: Elaboração própria

O número de segmentos analisados por Unidade da Federação e Distrito Federal consta na Figura 12. A maior densidade de segmentos está associada a Minas Gerais, Bahia e Mato Grosso do Sul, com, respectivamente, 344, 215 e 207 segmentos.

Com relação ao IRI, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul apresentaram média igual a 2,75, pouco superior, portanto, a média relacionada ao Estado da Bahia (= 2,62). Os extremos da série foram registrados no Acre, com média de 3,82 de IRI, para 40 segmentos, e em Alagoas, cujos 65 trechos retornaram média 2,25 (Figura 13).

Sobre o IGG, cujo número de segmentos analisados foi o mesmo para o IRI, Santa Catarina, Acre e Pará retornaram, respectivamente, média 95,55, 55,38 e 52,15, estando, assim, no extremo superior da escala. São Paulo foi a Unidade da Federação com menor IGG para os segmentos analisados, com média 10,52. Isto se deve a ausência de informações sobre os trechos federais e concessões no estado. Distrito Federal se posicionou uma classe acima, com média de IGG igual a 17,56 (Figura 14).

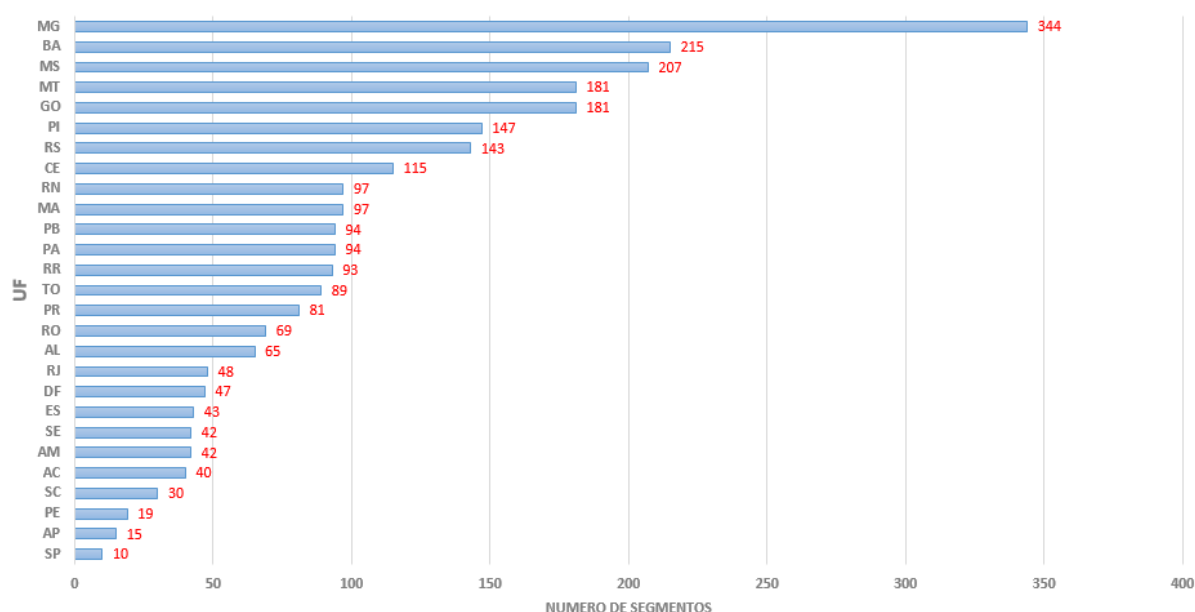


Figura 12. Número de segmentos analisados para IRI e IGG, por Unidade da Federação e Distrito Federal

Fonte: Elaboração própria.

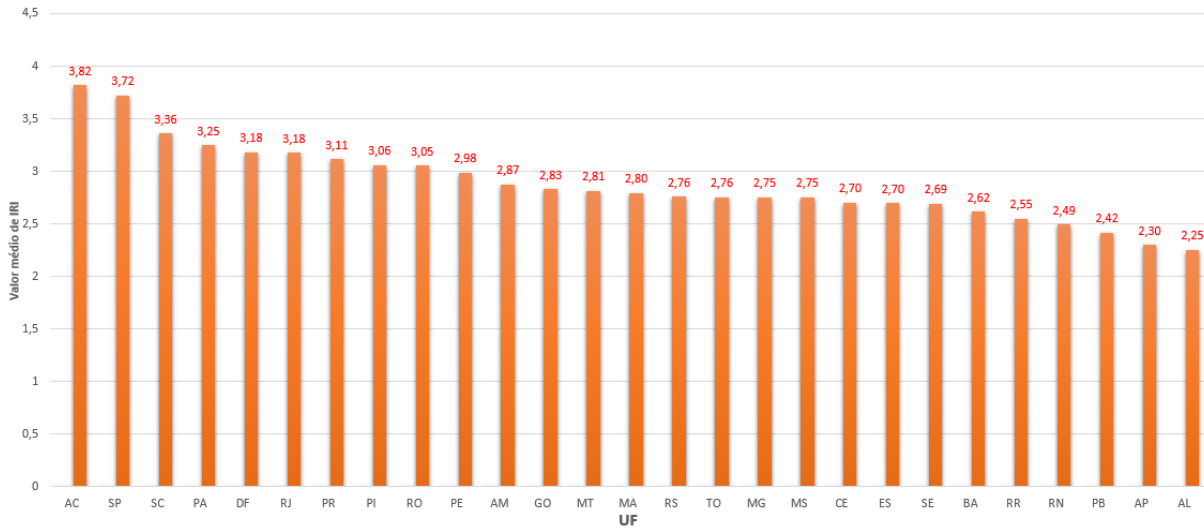


Figura 13. Valor médio de IRI para os segmentos analisados, por Unidade da Federação e Distrito Federal

Fonte: Elaboração própria.

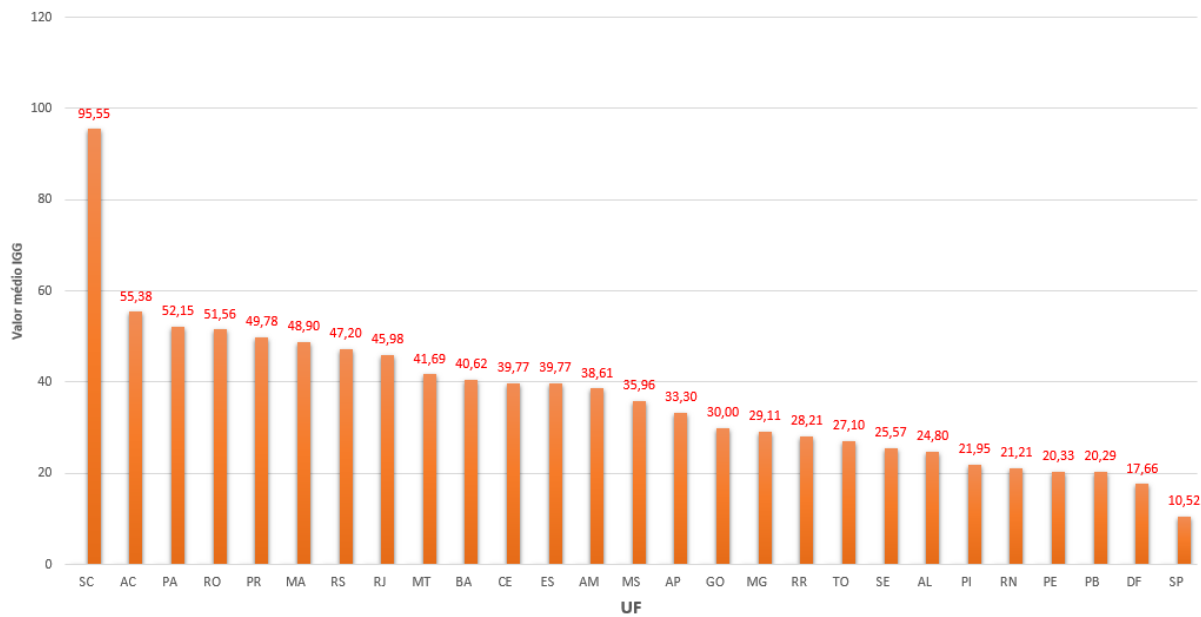


Figura 14. Valor médio de IGG para os segmentos analisados, por Unidade da Federação e Distrito Federal

Fonte: Elaboração própria.

As condições de Sinalização para os segmentos de rodovias analisados são apresentados nas Figuras 15 e 16.

Nota-se que a categoria “regular” prevalece com relação às demais (“péssimo”, “ruim”, “bom” e “ótimo”), contabilizando 3.034 segmentos, e que somente cinco segmentos foram considerados como os de melhor qualidade, sendo parte integrante do Estado de São Paulo e Goiás.

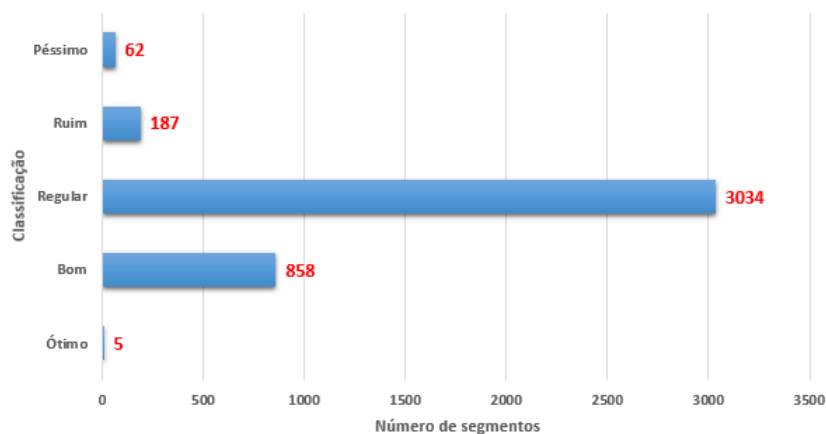


Figura 15. Número de segmentos rodoviários por condição da Sinalização

Fonte: Elaboração própria.

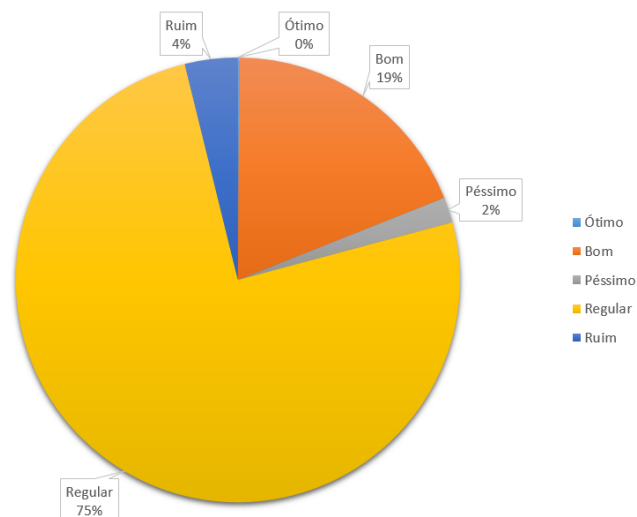


Figura 16. Participação relativa das cinco categorias de condição da Sinalização para os segmentos rodoviários analisados

Fonte: Elaboração própria.

As condições da Geometria para os segmentos de rodovias analisados são apresentados nas Figuras 17 e 18.

A categoria “regular”, uma vez mais, prevalece com relação às condições “péssimo”, “ruim”, “bom” e “ótimo”, contabilizando 2.817 segmentos. Somente 11 segmentos foram associados à melhor classe, sendo parte integrante do Estado de São Paulo e Rio de Janeiro.

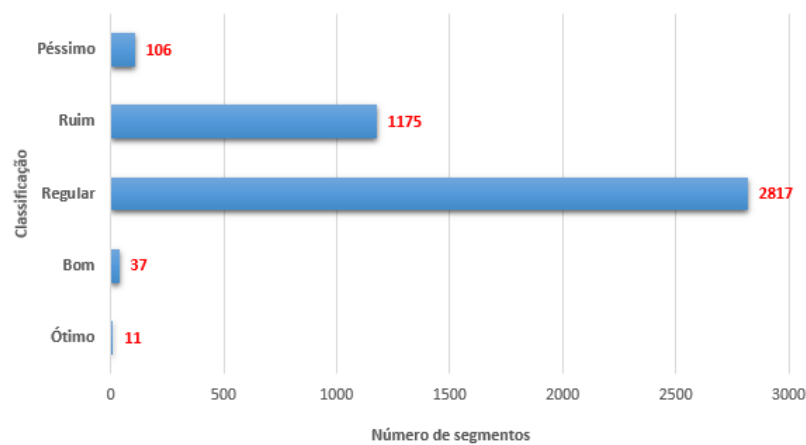


Figura 17. Número de segmentos rodoviários por condição da Geometria

Fonte: Elaboração própria.

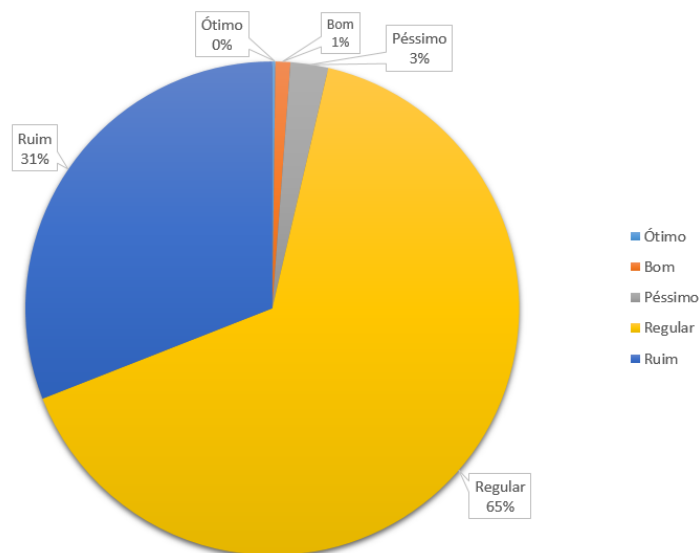


Figura 18. Participação relativa das cinco categorias de condição da Geometria para os segmentos rodoviários analisados

Fonte: Elaboração própria.

As condições referentes ao tipo de Superfície para os segmentos de rodovias analisados são apresentados nas Figuras 19 e 20.

As categorias PAV e DUP prevaleceram em relação às demais, contabilizando 4.167 segmentos. As demais categorias juntas contabilizaram 570 segmentos, ou cerca de 12% do total analisado.

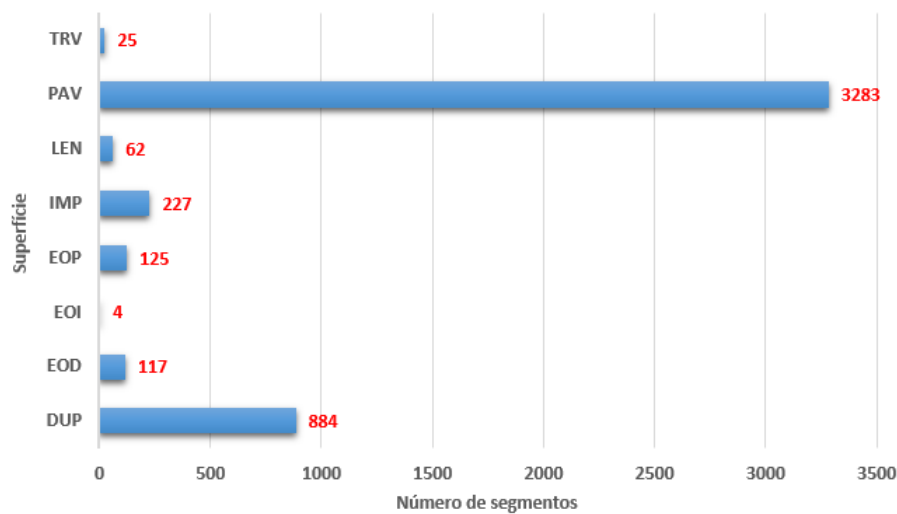


Figura 19. Número de segmentos rodoviários analisados por tipo de Superfície

Fonte: Elaboração própria.

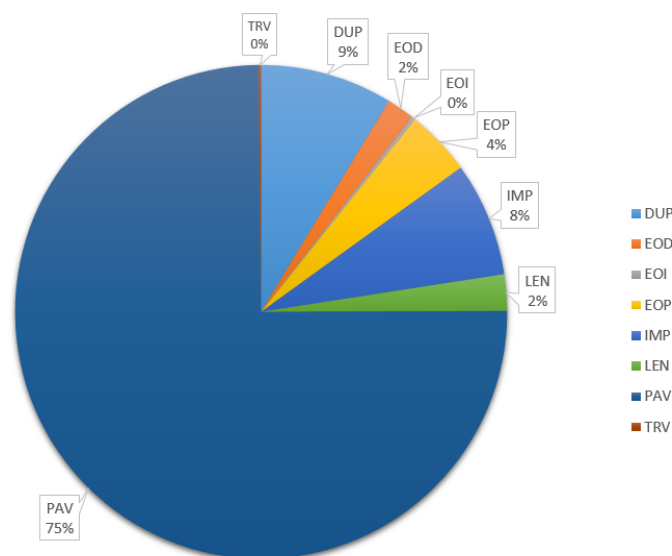


Figura 20. Participação relativa dos tipos de Superfície para os segmentos rodoviários analisados

Fonte: Elaboração própria.

3.1.2. Critérios de capacidade adaptativa

A capacidade adaptativa foi avaliada com base em critérios de localização, considerando a distribuição espacial dos segmentos homogêneos pelos Estados da Federação e Distrito Federal, e de gestão, os quais foram avaliados do ponto de vista da “capacidade de resposta”, ou capacidade adaptativa, envolvendo as categorias “maior”, “grande”, “relativo”, “baixo” e “insuficiente”. Adicionalmente, foi considerado o Volume Médio Diário – VMD, que traduz as condições de capacidade de carga (tráfego) das rodovias.

A avaliação da inserção dos segmentos rodoviários homogêneos por Unidade da Federação e Distrito Federal indica que 62% do total dos quase 52.000 km de segmentos avaliados se concentram em oito estados (MG, BA, MS, GO, MT, PI, RS e CE), totalizando cerca de 32.000 km (Figuras 21 e 22).

Apenas 1% (534,8 km) da malha rodoviária avaliada está inserida no Estado de São Paulo, que, sozinho, é responsável por mais de 30% do PIB nacional, o que lhe confere a maior capacidade de gestão. Os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro aparecem em segundo lugar no PIB nacional, com contribuição oscilando entre 8 e 30%. Juntos, congregam 8.611,6 km, ou 16% do total analisado, e, por tal, apresentam grande capacidade de resposta. Em seguida, aparecem RS, PR, SC e DF, com participação no PIB da ordem de 4 a 8%, configurando capacidade de resposta mediana. Nesses estados, foram contabilizados 301 segmentos rodoviários, num total de 5.071,3 km. Os estados MS, MT, GO, ES, BA, PE, CE, MA, PA e AM, com 25.362,6 km de extensão rodovias, apresentam contribuição ao PIB da ordem de 1 a 4% e, portanto, exibem baixo poder de resposta. Por fim, figuram RO, AC, RR, AP, TO, PI, RN, PB, AL e SE, com poder de resposta avaliado como insuficiente, pois contribuem, individualmente, com menos de 1% para o PIB nacional. Os 751 segmentos avaliados totalizam 12.206,8 km de extensão.

As Figuras 21 a 23 apresentam a síntese da avaliação para a localização dos segmentos rodoviários por UF e DF.

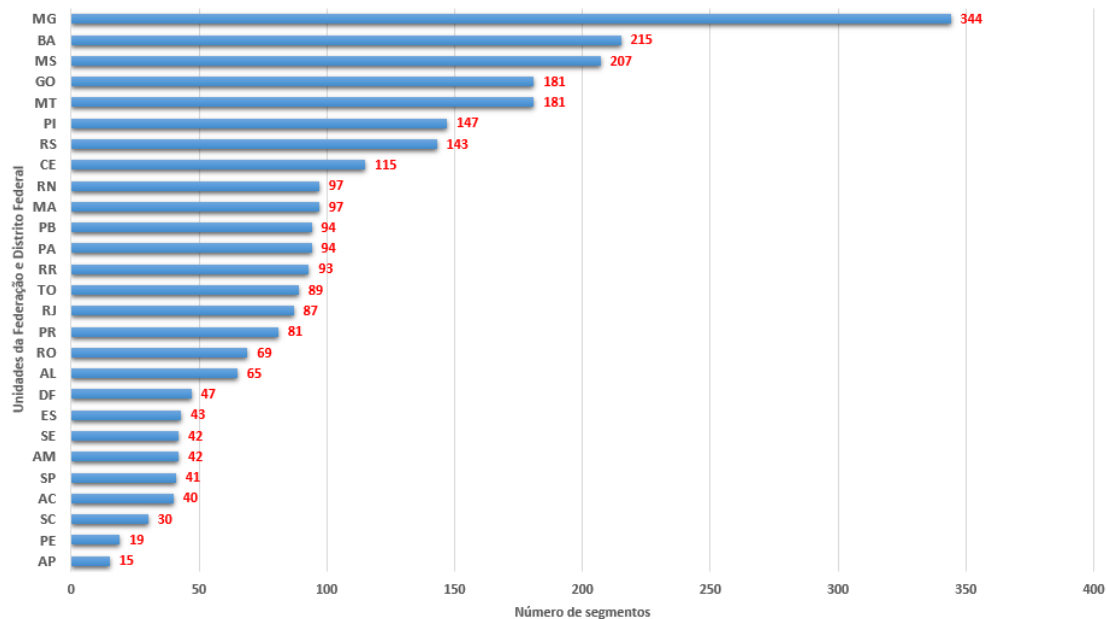


Figura 21. Número de segmentos rodoviários por Unidade da Federação e Distrito Federal, para o critério de localização

Fonte: Elaboração própria.

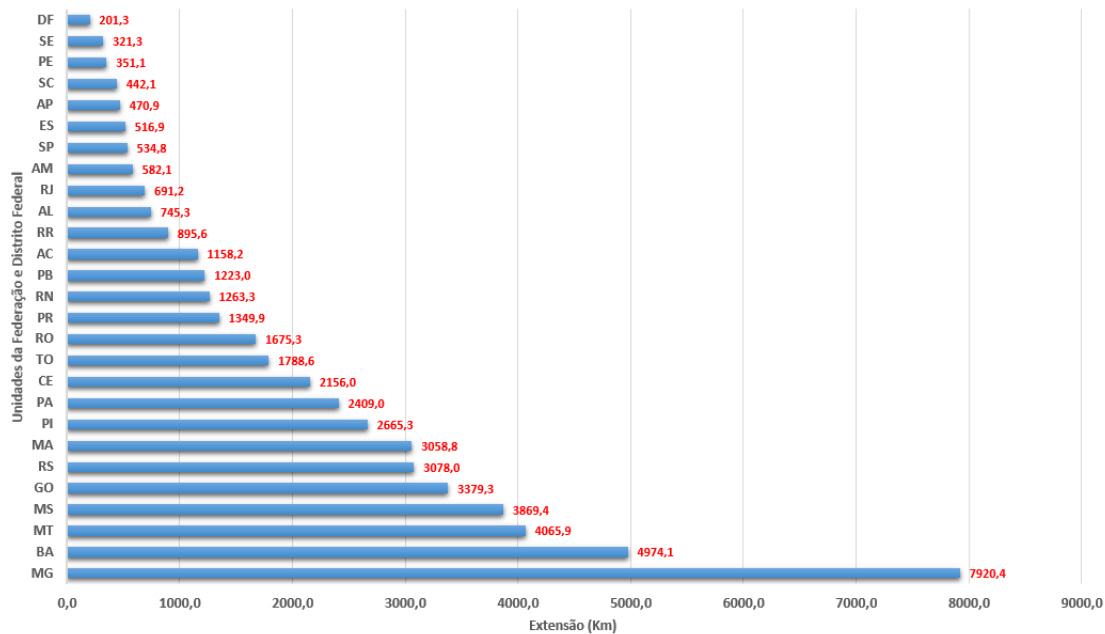


Figura 22. Extensão (em Km) dos segmentos rodoviários por Unidade da Federação e Distrito Federal, para o critério de localização

Fonte: Elaboração própria.

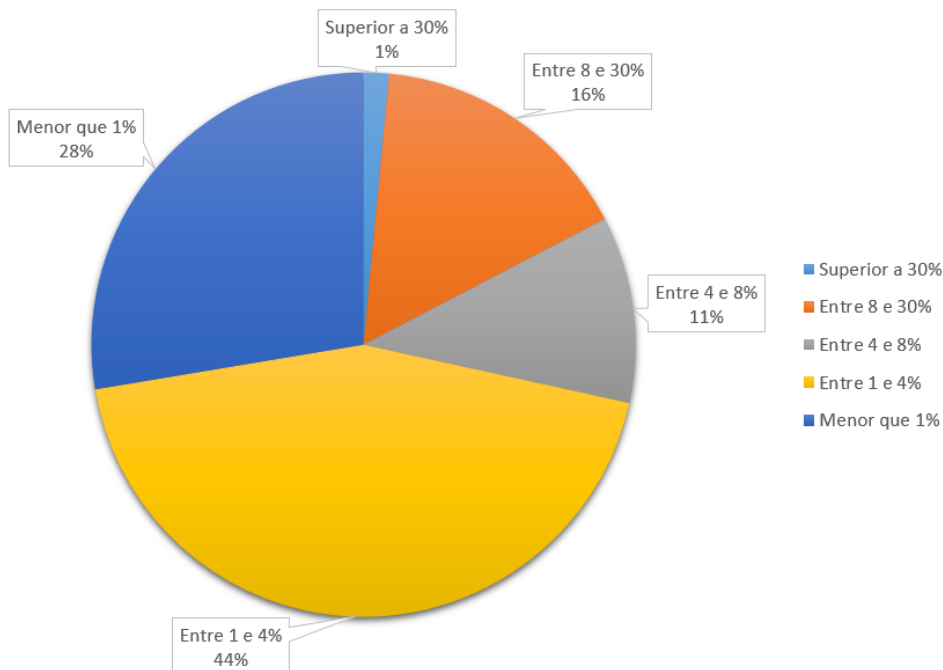


Figura 23. Participação relativa das cinco categorias de agregação de Unidades da Federação e Distrito Federal na formação do PIB nacional

Fonte: Elaboração própria.

A capacidade adaptativa do universo de segmentos rodoviários, objeto do presente estudo, foi também analisada do ponto de vista do critério de administração/gestão. Nesse sentido, 88% do universo amostral, ou o equivalente a 45.530,3 km, apresentam poder de resposta mediano, em função de serem, atualmente, administrados diretamente pelo DNIT. Em contraponto, a categoria “concessão”, ainda que abarcando apenas 11% da malha avaliada, num total de 5.610,7 km de extensão, exibe a maior capacidade de resposta, contrastando fortemente, por seu turno, com o poder insuficiente de resposta associado aos 620,0 km de segmentos rodoviários não federais (Figura 24).

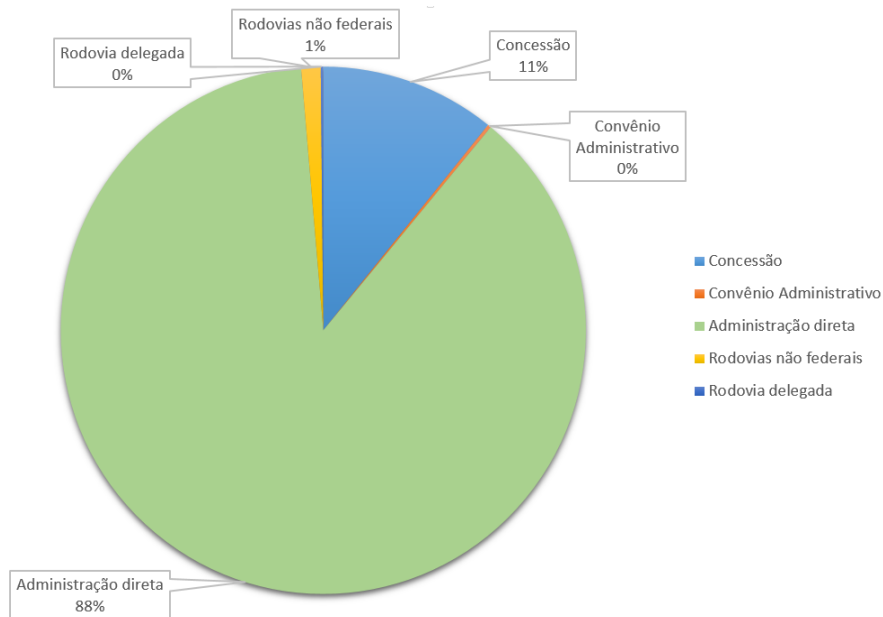


Figura 24. Participação relativa das cinco categorias de administração/gestão de segmentos de rodovias analisados

Fonte: Elaboração própria.

Com relação ao VMD, 48,9% dos 2.178 segmentos avaliados se enquadram na média de até 5.000 veículos/dia, ao passo que 30% possuem VMD entre 5.001 e 10.000. De forma complementar, 16,9% dos segmentos apresentam VMD variando entre 10.001 e 20.000 e apenas 1% entre 20.001 e 40.000. Acima de 40.000 de volume médio de tráfego, foram enquadrados somente 3,4% do total de segmentos avaliados (Figuras 25 a 27).

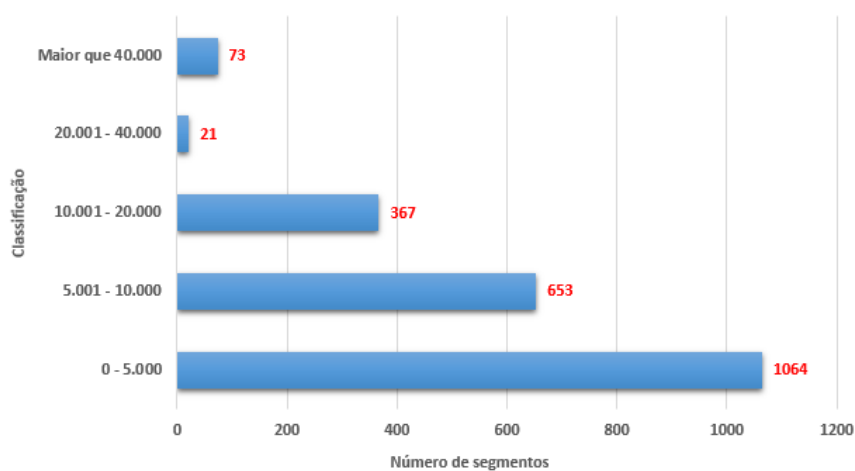


Figura 25. Volume Médio Diário - VMD para os segmento rodoviários analisados

Fonte: Elaboração própria

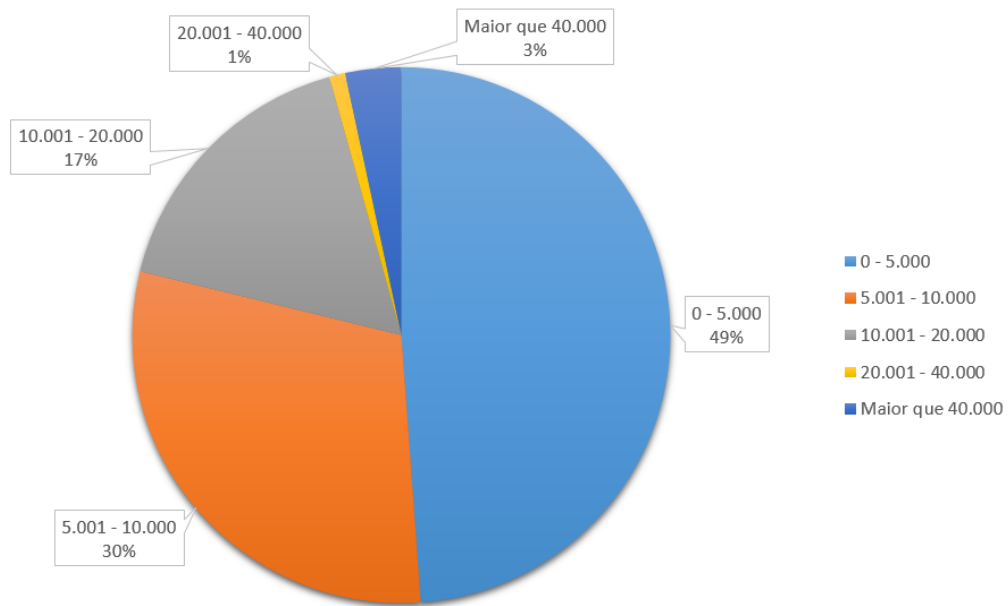


Figura 26. Percentual de segmentos rodoviários por categoria de Volume Médio Diário - VMD

Fonte: Elaboração própria.

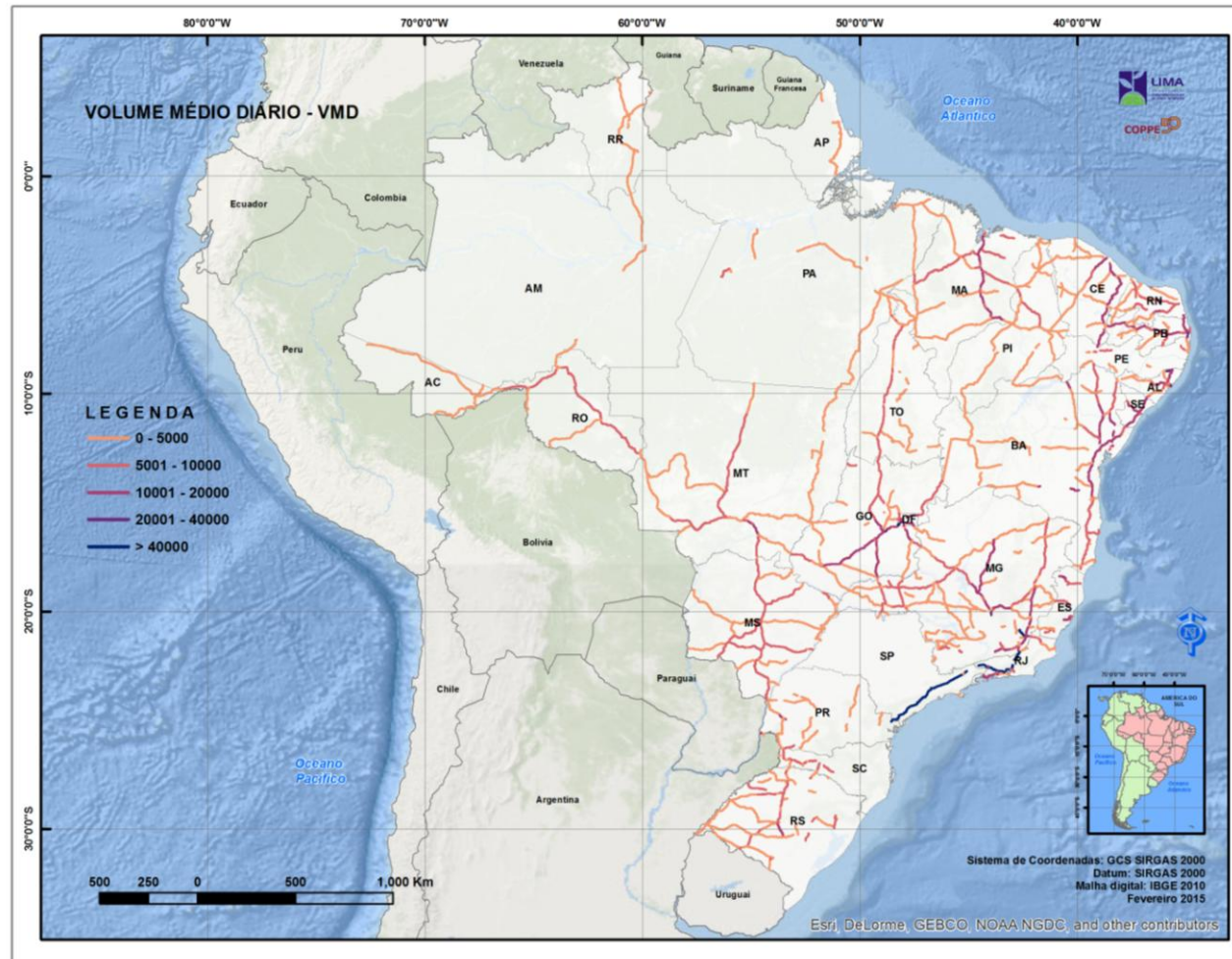


Figura 27. Volume Médio Diário – VMD, para os segmentos de rodovias analisados

Fonte: Elaboração própria

3.2. Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária (IVIR)

As Figuras 28 e 29 apresentam, respectivamente, a vulnerabilidade da infraestrutura rodoviária presente e futura.

A análise das condições presentes considera os dados alfanuméricos do SGP (período 2013/2014) e a base georreferenciada do SNV (março de 2015) para 126 mil km trechos de rodovias do Sistema de Gestão de Pavimentos - SGP do DNIT, 64 mil km dos quais são federais, 44 mil km estaduais e 17 mil km relativos a rodovias planejadas para o horizonte de 2030 (estaduais e federais). Dessa forma, a base de dados utilizada cobre 81% da malha federal.

A vulnerabilidade futura, por sua vez, considera a mesma base de dados georreferenciados da malha de rodovias do DNIT, porém sob condições de clima futuro, para os índices de extremos Temp7dias e RX1day, associados aos modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5 do INPE, para o RCP 4.5 e RCP 8.5.

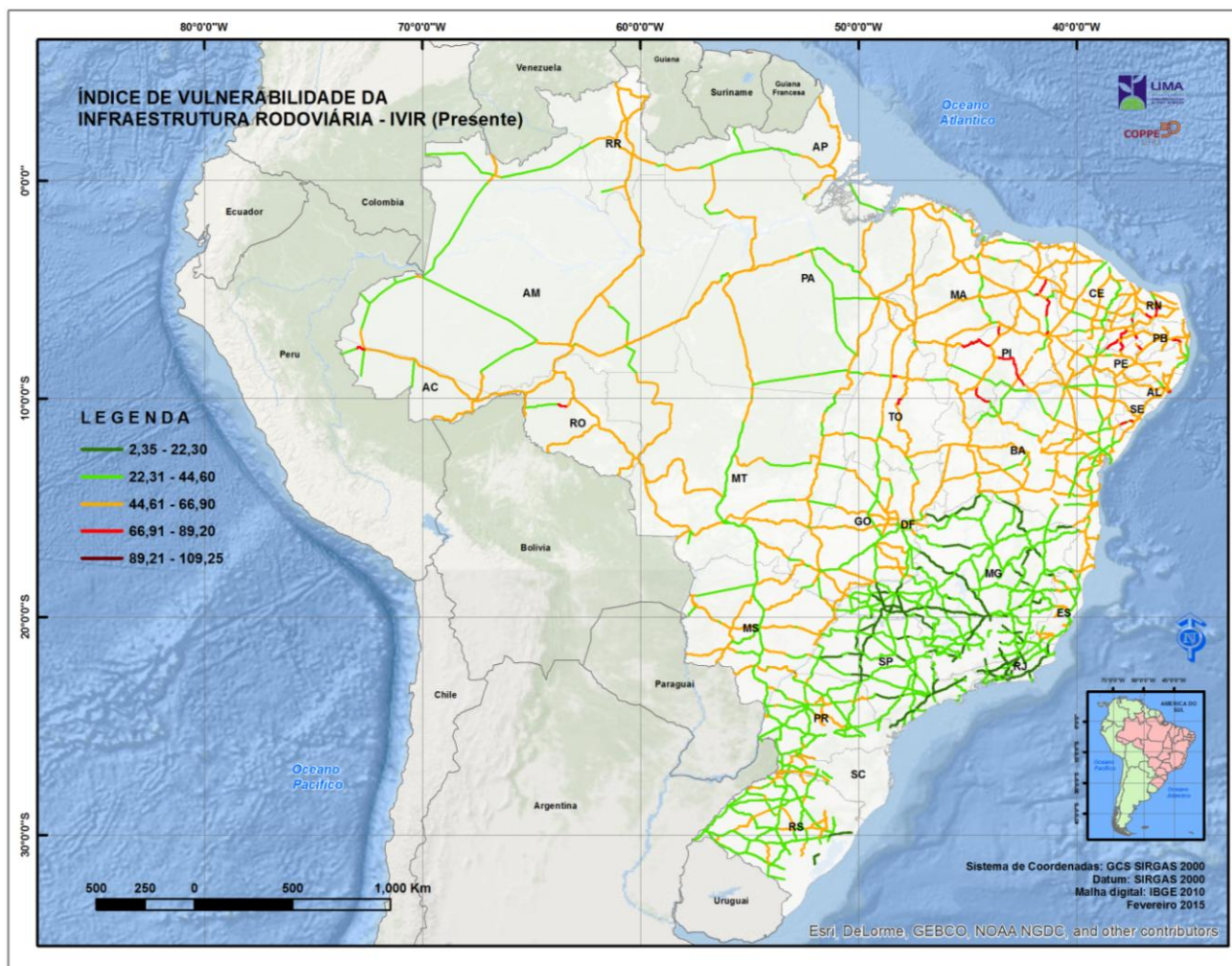


Figura 28. Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária – IVIR (período presente)

Fonte: Elaboração própria

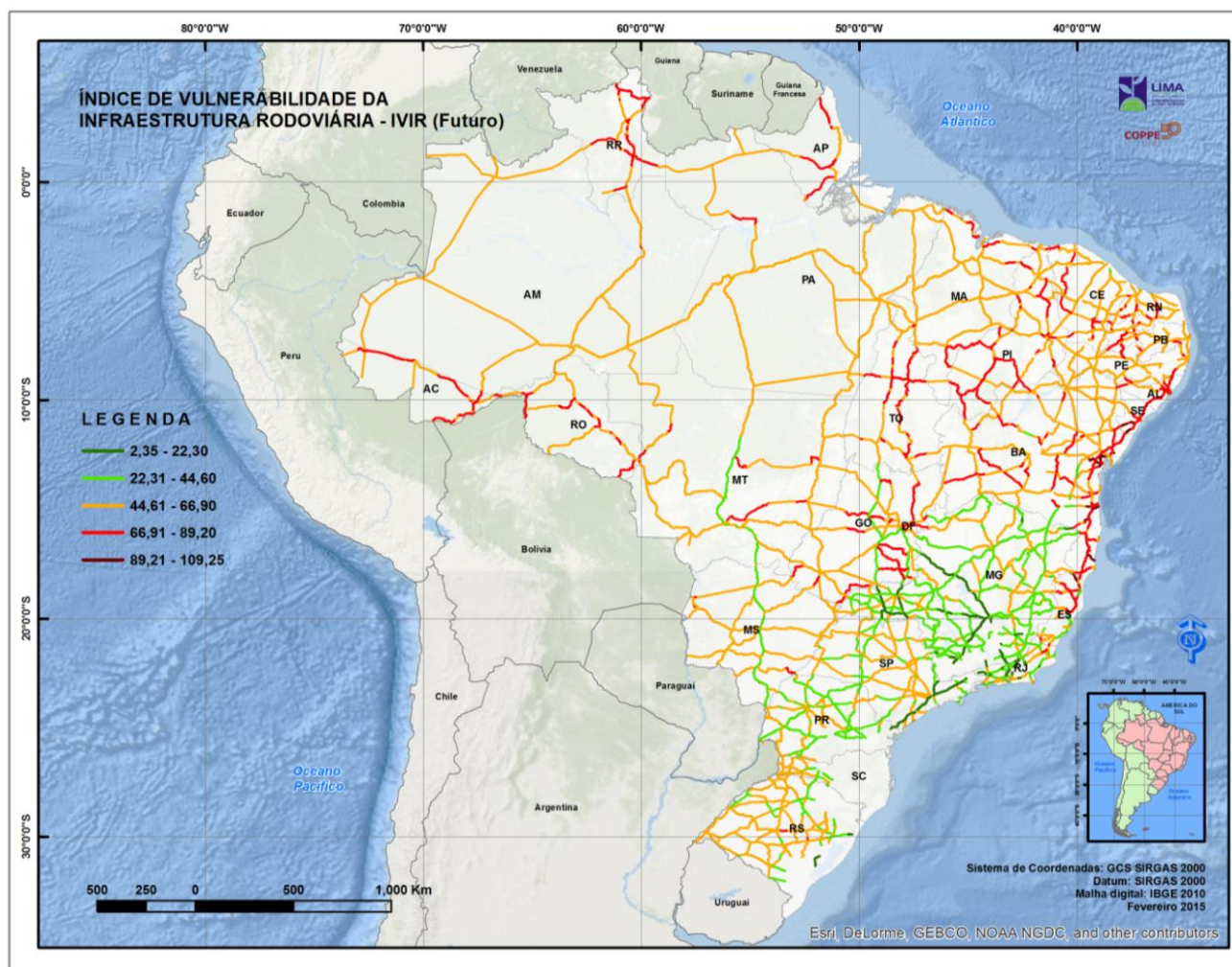


Figura 29. Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária – IVIR (período futuro)

Fonte: Elaboração própria

A vulnerabilidade presente e futura foi obtida pela análise das características da malha rodoviária atual, desde o ponto de vista do perfil administrativo, condições técnicas e de tráfego, bem como a localização dos segmentos rodoviários por Unidade da Federação e Distrito Federal.

O intervalo de valores absolutos de vulnerabilidade no presente variou de 2,35 a 73,75. A classe com maior participação relativa foi a que agregou valores entre 45,19 a 49,95, com 1219 registros (Figura 30). Para a vulnerabilidade futura, que variou entre 2,35 e 109,25, a classe com maior participação relativa agregou valores entre 52,23 e 59,36, com 1492 registros (Figura 31).

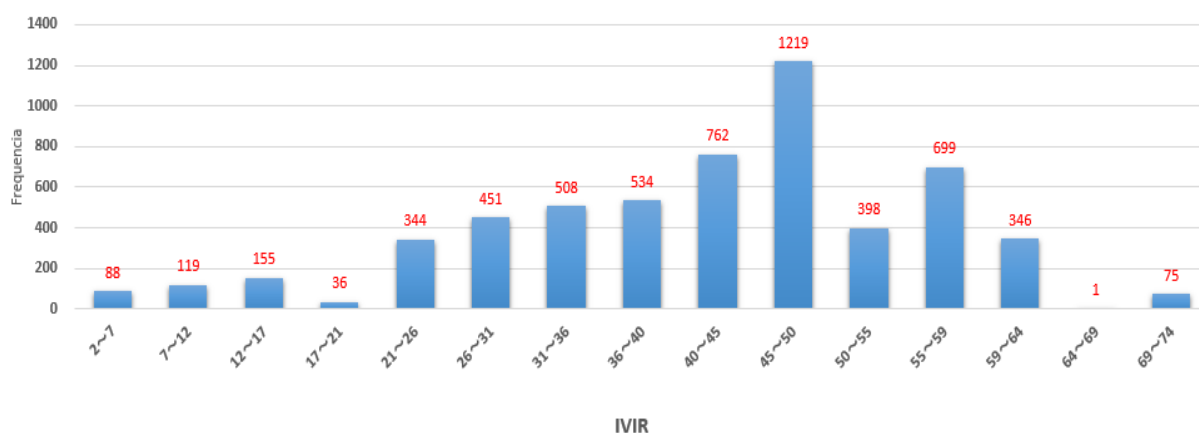


Figura 30. Histograma de distribuição do Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária (IVIR) presente

Fonte: Elaboração própria.

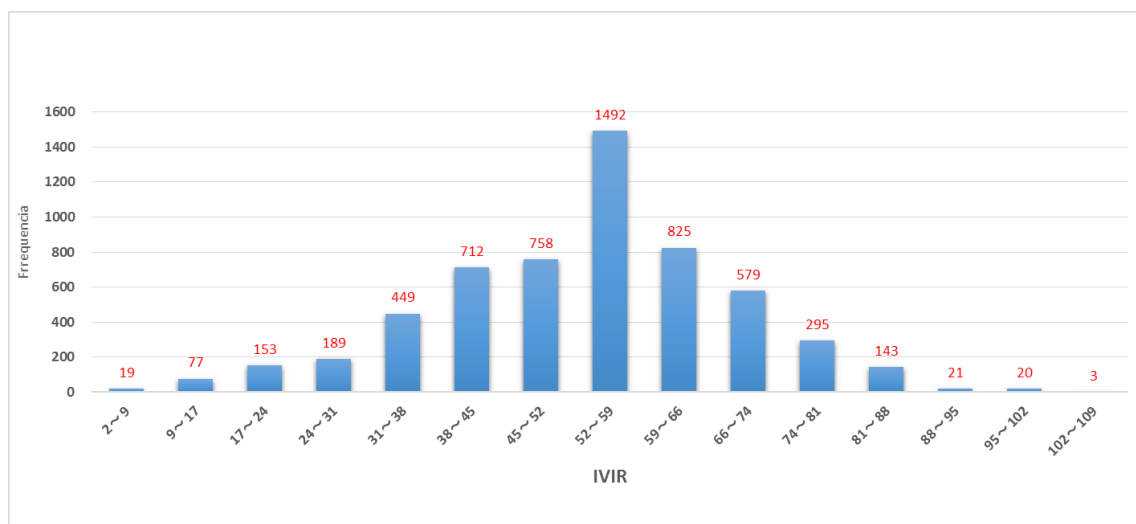


Figura 31. Histograma de distribuição do Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária (IVIR) futuro (período de integração 2011-2040)

Fonte: Elaboração própria.

O resultado da padronização do IVIR para o período presente e futuro se encontra nas Figuras 32 e 33.

A padronização teve por objetivo tornar mais clara a distância relativa entre os valores de vulnerabilidade da malha rodoviária, que passam a se situar entre 0,00 e 1,00, o que possibilitou comparar e interpretar os valores de vulnerabilidade diretamente.

A padronização foi obtida com base na seguinte fórmula:

$$IVIR_p = \left(\frac{IVIR \text{ do segmento rodoviário} - \text{Menor IVIR entre os segmentos rodoviários}}{\text{Maior IVIR entre os segmentos rodoviários} - \text{Menor IVIR entre os segmentos rodoviários}} \right)$$

Assim, valores altos de IVIR_p (iguais ou próximos de 1,00) indicam segmentos rodoviários com maior vulnerabilidade *relativa*, ao passo que valores inferiores (iguais ou próximos de 0,00) correspondem a segmentos em situação *relativa* de menor vulnerabilidade.

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

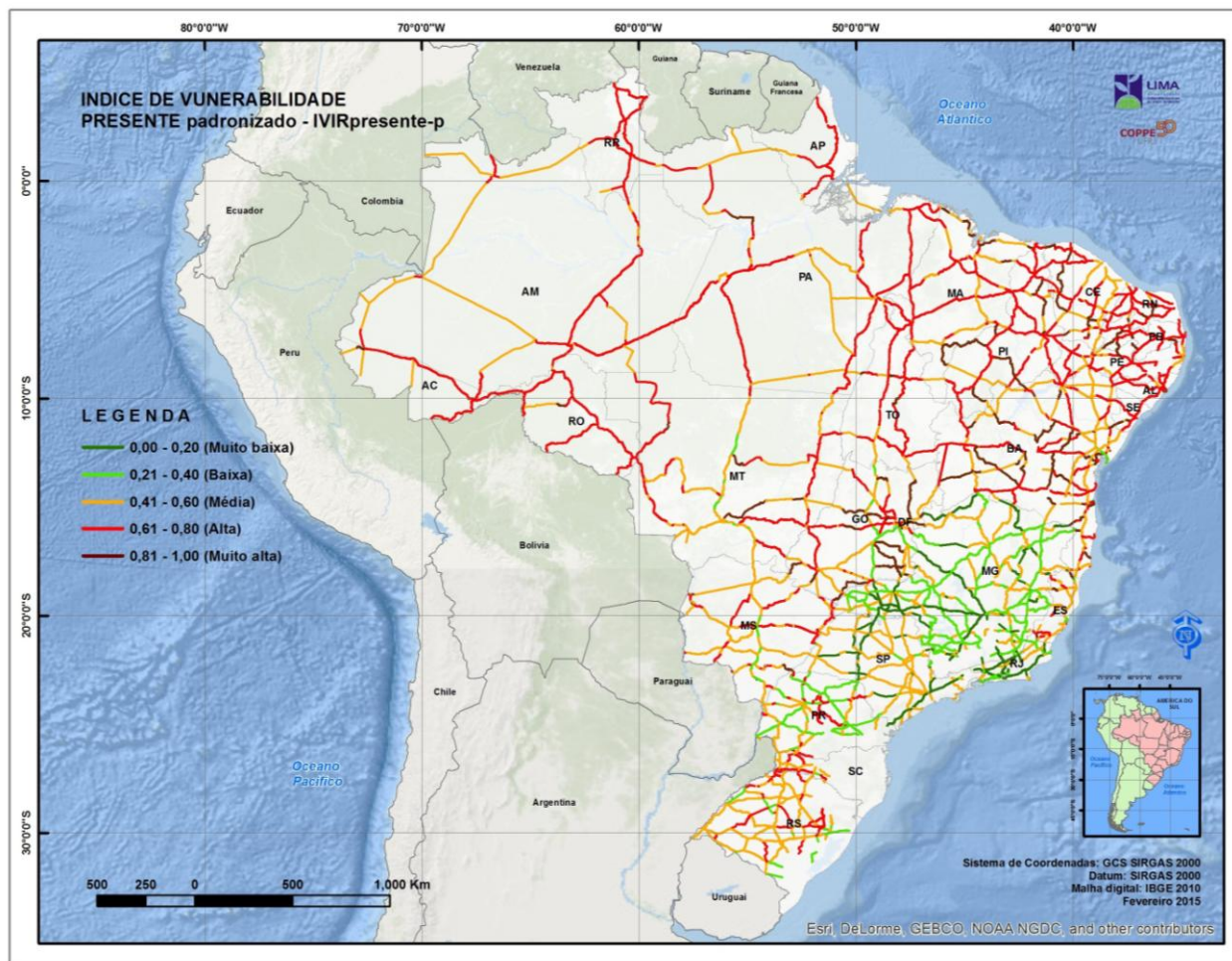


Figura 32. Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária presente padronizado (IVIRpresente-p)

Fonte: Elaboração própria.

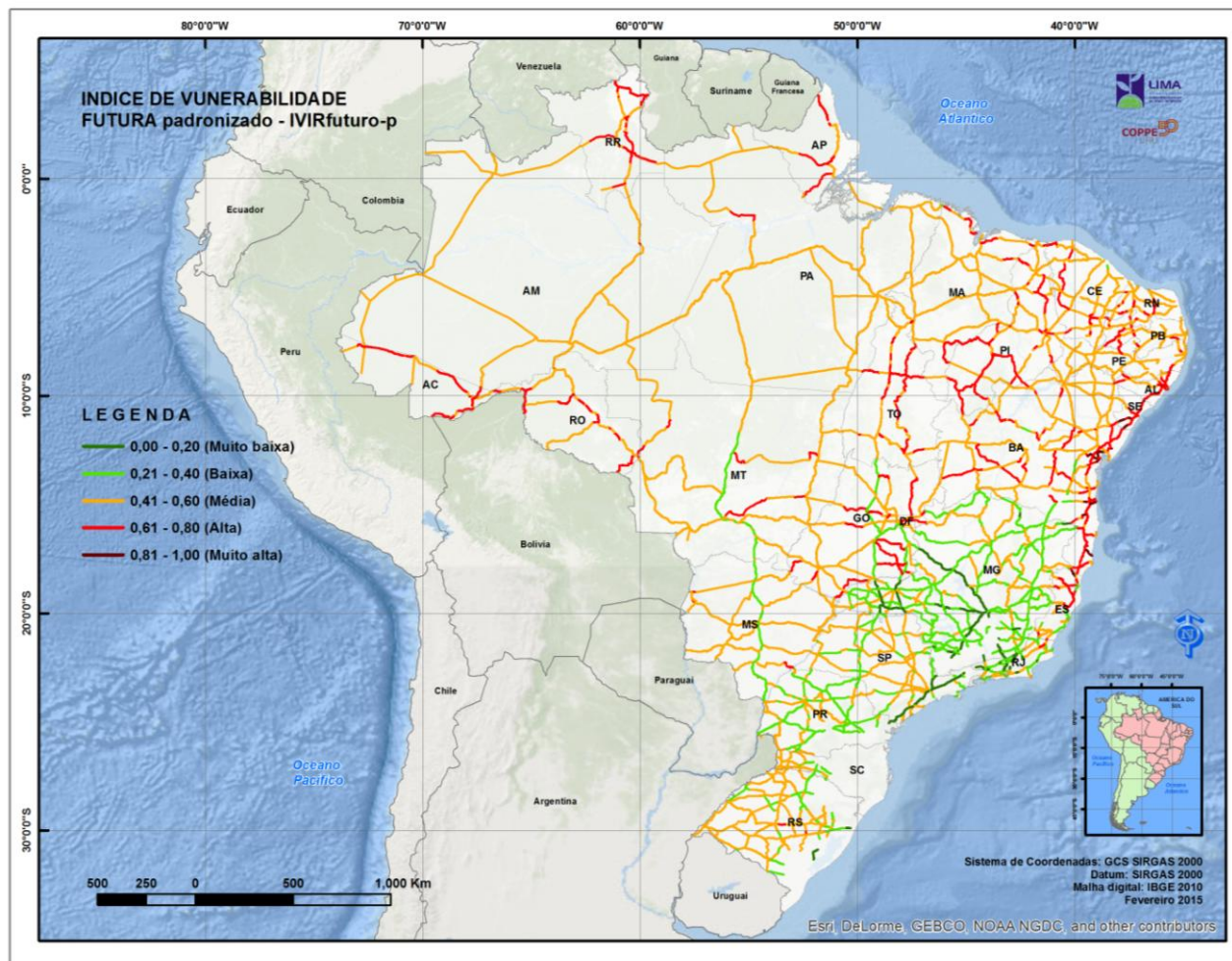
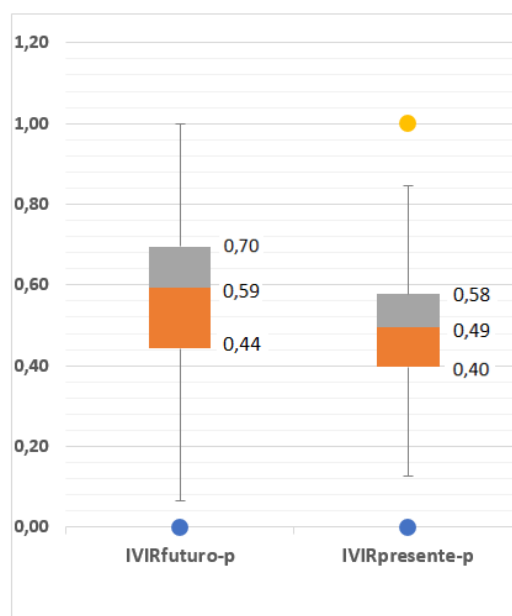


Figura 33. Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária futuro padronizado (IVIRfuturo-p)

Fonte: Elaboração própria

A distribuição dos valores de vulnerabilidade para o período presente e futuro é apresentado na Figura 34.

A vulnerabilidade presente exhibe mediana igual a 0,59, e 0,70, para o terceiro quartil, que agrega 75% da amostra de segmentos. Com relação à vulnerabilidade global futura, a média obtida foi de 0,49, o que a posiciona numa situação de média vulnerabilidade. Os valores do IVIRp estão bem distribuídos ao redor da mediana, o que configura certo equilíbrio entre valores de vulnerabilidade para o conjunto de segmentos rodoviários analisados. Nesse caso, o número relativamente pouco significativo de valores extremos de vulnerabilidade (0,00 ou 1,00) constituíram *outliers* da série.



	IVIRfuturo-p	IVIRpresente-p
Min	0,00	0,00
Q₁	0,44	0,40
Median	0,59	0,49
Q₃	0,70	0,58
Max	1,00	1,00
IQR	0,25	0,18
Outlier superior	0	24
Outlier inferior	85	85

Figura 34. *Boxplot* para o Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária padronizado (IVIRp) presente e futuro

Fonte: Elaboração própria.

A distribuição espacial dos segmentos da malha rodoviária situados nas categorias de alta e muito alta vulnerabilidade no presente e sob condições de clima futuro é apresentada nas Figuras 35 e 36.

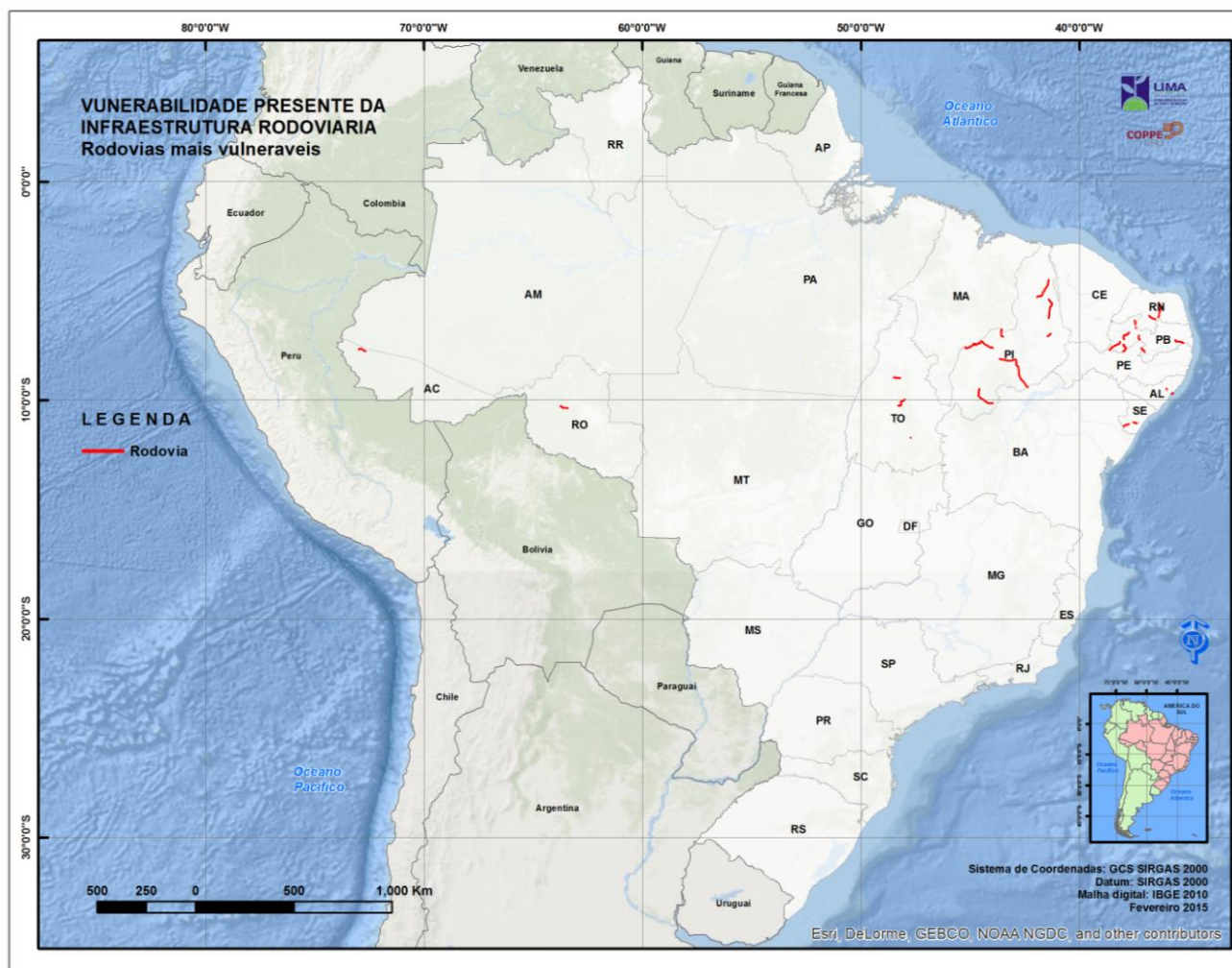


Figura 35. Segmentos de rodovias mais vulneráveis no presente, com base no Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária presente – IVIRp

Fonte: Elaboração própria.

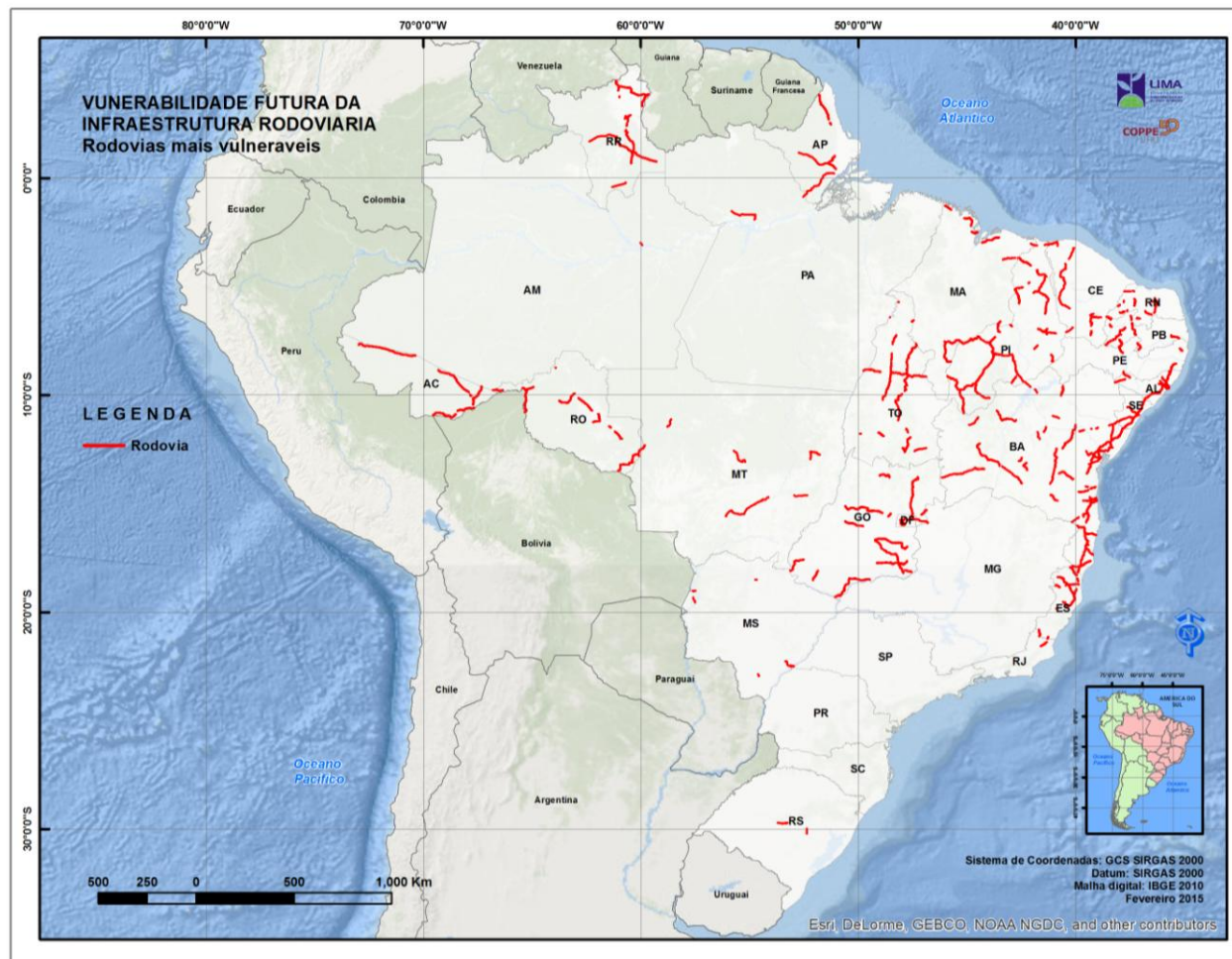


Figura 36. Segmentos de rodovias mais vulneráveis no futuro, com base no Índice de Vulnerabilidade da Infraestrutura Rodoviária presente – IVIRp

Fonte: Elaboração própria

Os segmentos de alta e muito alta vulnerabilidade no presente, do ponto de vista dos indicadores analisados, estão associados a segmentos de rodovias situados nos estados do Acre, Alagoas, Paraíba, Piauí, Rio Grande do Norte, Rondônia e Tocantins, ao passo que segmentos de outros 14 estados e do Distrito Federal passam a figurar nessas mesmas classes de vulnerabilidade no futuro (Figura 37). Considerando ambas as situações, foram registrados 76 e 987 segmentos rodoviários, respectivamente.

Do ponto de vista da tipologia de superfície, rodovias pavimentadas (PAV), em leito natural (LEN) e implantadas (IMP) possuem o maior número de segmentos vulneráveis no presente. Para a tipologia PAV, foram contabilizados 1209,2 km referentes a 62 segmentos; para a tipologia LEN, os seis segmentos somaram 198,4 km. Por fim, para o IMP, o total de extensão associado a seis segmentos somou 166,7 km (Figura 38).

Para o período futuro, rodovias planejadas (PLA) e pavimentadas (PAV) agregaram o maior número de segmentos vulneráveis, contando, respectivamente, 8634,3 e 6228,7 km de extensão, no período futuro (Figura 39).

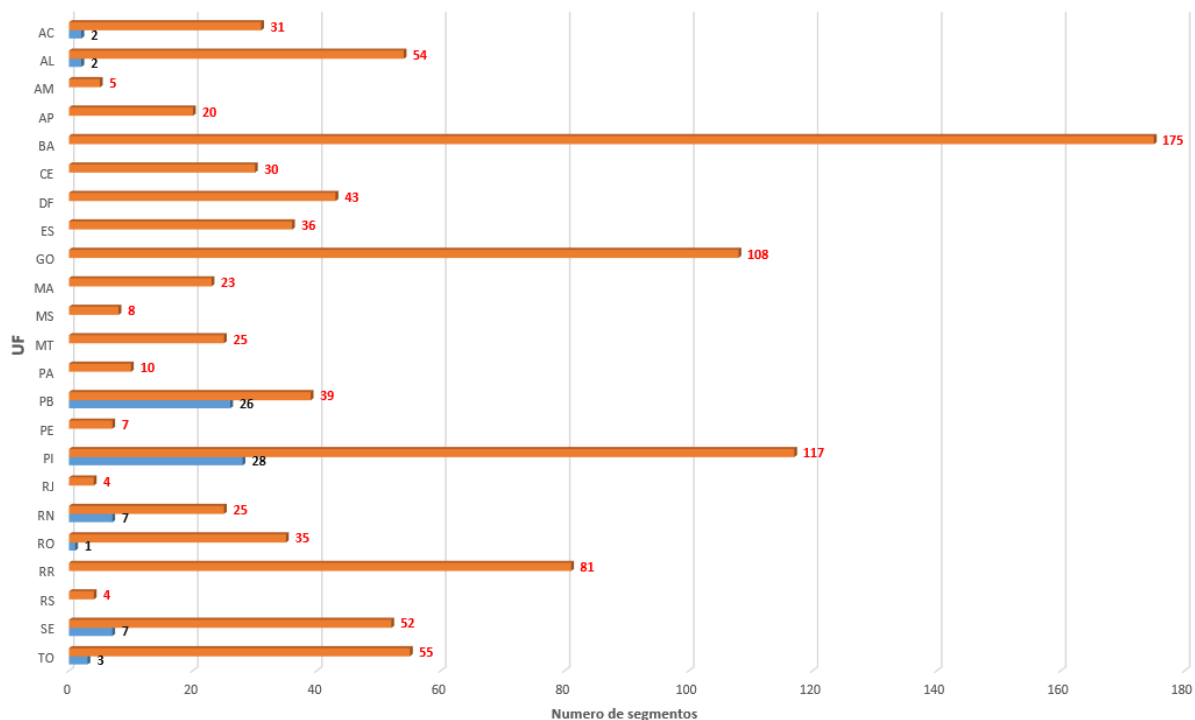


Figura 37. Número de segmentos de rodovias nas Unidades da Federação e Distrito Federal de alta e muito alta vulnerabilidade, para o período presente (azul) e futuro (laranja).

Fonte: Elaboração própria.

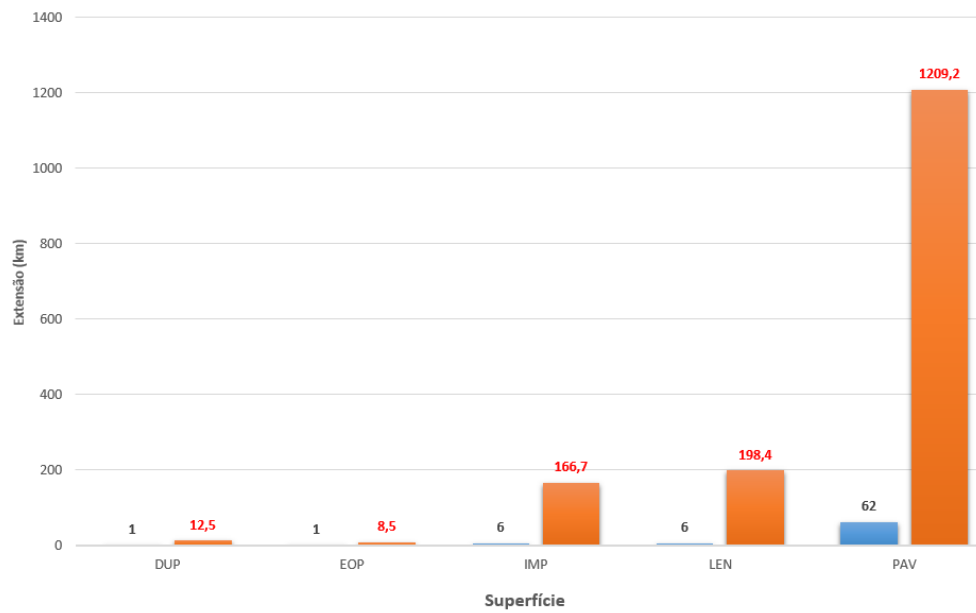


Figura 38. Extensão (km) da malha rodoviária por tipo de superfície de alta e muito alta vulnerabilidade, para o período presente

Fonte: Elaboração própria.

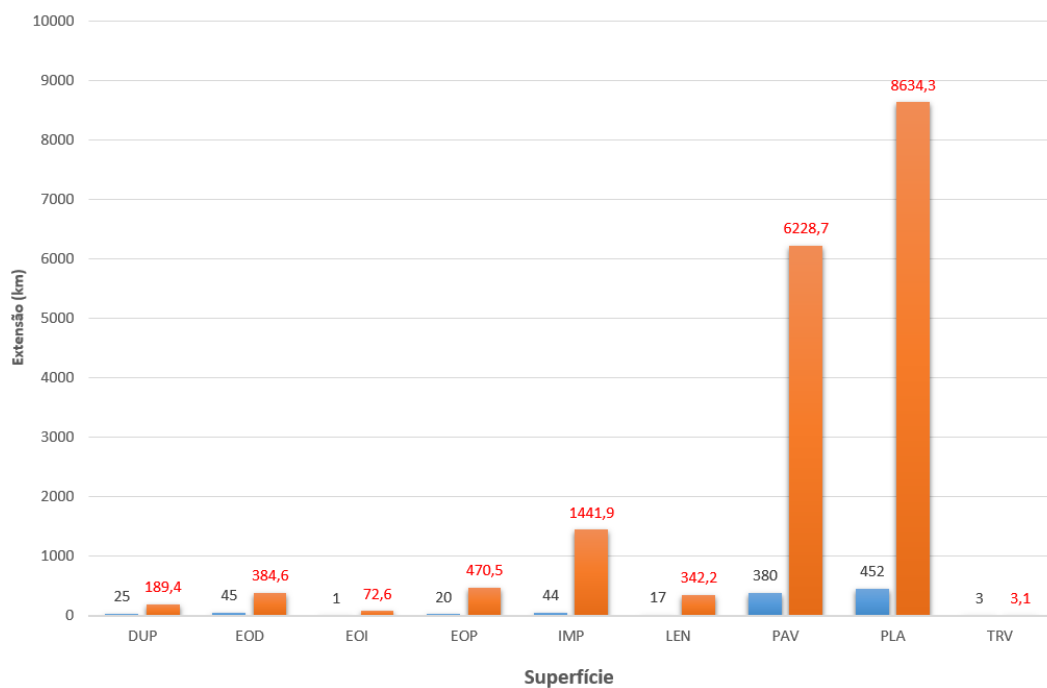


Figura 39. Extensão (km) da malha rodoviária por tipo de superfície de alta e muito alta vulnerabilidade, para o período futuro

Fonte: Elaboração própria.

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Os resultados obtidos no presente estudo aponta para um cenário futuro pautado pelo elevado grau de exposição da malha rodoviária nacional em *hotspots* climáticos definidos por condições extremas de temperatura e precipitação pluviométrica. Tais extremos, por seu turno, foram determinados com base na sensibilidade do pavimento asfáltico e do sistema de microdrenagem a temperaturas e índices pluviométricos acima dos quais haveria a real possibilidade dos impactos do clima ocasionar danos à malha, com consequências as mais diversas.

Contudo, a vulnerabilidade da malha rodoviária variou amplamente no território, em decorrência da tipologia e notas atribuídas aos diversos PVA adotados, para se proceder a esse tipo de análise. Considerando o IVIRp, que é o índice sintético adimensional que integra todos os PVA, nota-se que as regiões Sudeste e Sul, tanto no presente quanto no período de integração futuro (2011-2014) são as menos vulneráveis. Via de regra, esse resultado está atrelado ao pertencimento da malha a unidades da federação com maior PIB, com relação à gestão (maior percentual de infraestrutura sob concessão) e integridade física (IRI, IGG) e perfil de projeto (sinalização e geometria).

Globalmente, o IVIRp no presente indica a existência de um numero relativamente reduzido de segmentos rodoviários de alta e muito alta vulnerabilidade, em flagrante contraste com o período futuro: no primeiro caso, apenas oito estados detinham segmentos vulneráveis nessas classes, contra 22 estados, além do Distrito Federal, no período futuro. Neste último, em particular, há uma grande concentração de segmentos na Região Nordeste, particularmente no litoral, onde o índice RX1day prevaleceu. Por seu turno, por abranger mais de 90% do território nacional, os hotspots derivados do índice extremo de temperatura (Temp7dias) abrangeram uma vasta parte da malha rodoviária, indicando que os limites de resistência do pavimento asfáltico para altas temperaturas foi ultrapassado nesse espaço. Portanto, as ondas de calor são as que apresentam maior peso no contexto da vulnerabilidade da infraestrutura rodoviária para o período de integração 2011-2041, considerando os parâmetros físicos das rodovias adotados como referência para esse tipo de análise no presente estudo.

Cumprе salientar, porém, que há um elevado grau de incerteza com relação à modelagem climática utilizada, a qual é inerente à própria dinâmica do sistema climático, dos cenários climáticos (histórias do futuro) e da parametrização dos processos do clima que ocorrem em escala inferior à da grade dos modelos. Portanto, os resultados obtidos devem ser considerados tão somente uma primeira aproximação para a análise da vulnerabilidade da malha rodoviária nacional, considerando, adicionalmente, as seguintes ressalvas:

- A análise da exposição deve ser ampliada considerando uma maior gama de fatores que são suscetíveis, direta ou indiretamente, aos impactos das mudanças climáticas, a exemplo da localização geográfica, topografia e idade da malha rodoviária.
- Para efeito de análise do dimensionamento do sistema de microdrenagem, também deve ser levado em consideração modelos hidrológicos, sobretudo no caso de estradas planejadas, as quais apresentam ampla margem de interferência no projeto. Essa assertiva é extensível ao tipo de pavimento a ser adotado, considerando os potenciais e novos padrões de temperatura no futuro;
- A análise da vulnerabilidade deve levar em consideração, adicionalmente, aspectos de planejamento, como o grau de redundância da malha, assim como o valor dos ativos (em termos de custo de reposição, por exemplo), impactos ambientais, valor cultural ou histórico e perdas de vidas, decorrentes de fatalidades climáticas no passado.

O avanço do conhecimento no campo da vulnerabilidade da infraestrutura rodoviária, entretanto, esbarra em empecilhos de ordens diversas. A ausência de dados e informações é um grave fator restritivo, e diz respeito: a) aos impactos de eventos climáticos relevantes registrados no passado e que tenham ocasionado danos às rodovias e falhas operacionais; b) medidas adotadas, custos associados à reparação dos ativos, ao estabelecimento de rotas alternativas, perda de produção e o tempo decorrido para o reestabelecimento da normalidade operacional dos segmentos afetados. Tais informações devem ser ponderadas com relação às condições de clima futuro, como um exercício para se avaliar potenciais condições de vulnerabilidade, sem considerar possíveis medidas adaptativas.

No Brasil, até o presente momento, não há um banco de dados consistente (territorialmente abrangente, com a necessária resolução, acessível para uso imediato, sobre os efeitos de eventos climáticos na infraestrutura rodoviária e não há indícios de que essa situação irá mudar no curto prazo. Tal banco de dado é importante para se determinar a resiliência atual e para prover a base para estudos sobre impactos relacionados ao clima futuros. Assinalamos, como particularmente estratégico, o desenvolvimento de estudos sobre o risco de afogamento da infraestrutura rodoviária em decorrência de chuvas fortes, em todo o território nacional.

Com relação à investigação de eventos do clima passado e que são a base para análise da influência do clima futuro na infraestrutura rodoviária, devem considerar, minimamente, os

seguintes aspectos: a) a natureza do evento climático; b) o alcance espacial do evento, incluindo detalhes tais como a elevação do terreno e extensão da infraestrutura afetada; c) tempo decorrido entre o evento e a volta à normalidade das operações; d) extensão do dano; e) custos associados à natureza dos reparos.

Tendo em vista tornar a infraestrutura de transporte menos vulnerável e mais adaptada, é necessário incorporar ao processo de planejamento os possíveis impactos do clima futuro, com base nos modelos climáticos em escala compatível com as avaliações. Foco deve ser dado na reavaliação de projeto de rodovias planejadas à luz dos padrões climáticos futuros, observando, se pertinente, a introdução de alterações em projetos de sinalização, geometria e tipo de pavimento, o aumento da redundância de trechos rodoviários específicos, bem como os investimentos em manutenção. Em um momento posterior, o conhecimento adquirido deve ser incorporado a normas de construção e políticas existentes.

Faz-se necessário, ainda, estabelecer estudos sobre a vulnerabilidade integrada da infraestrutura rodoviária e demais modais de transportes, em função da elevada interdependência entre os mesmos. Trata-se, portanto, da condução de estudos que considerem o sistema de transporte como um todo, considerando a elevada interdependência entre os mesmos, no sentido de elevar a resiliência do sistema de transporte nacional (por ex., hidrovias prejudicadas por longos períodos de seca sobrecarregam o sistema rodoviário, que, por seu turno, interfere diretamente na operação de portos). Algumas implicações decorrentes dessa abordagem holística da vulnerabilidade da infraestrutura rodoviária seriam a necessidade de maior colaboração e coordenação de esforços entre diferentes agências de governo; um olhar mais apurado não somente sobre os riscos associados às mudanças climáticas, mas também com relação à dinâmica dos sistemas socioeconômicos afetados pelos eventos climáticos e reflexos no uso e ocupação do solo.

Por fim, a vulnerabilidade deve ser pensada considerando o uso de ferramentas de análise de risco, trabalhando aspectos quantitativos e probabilísticos, tendo em vista as incertezas inerentes à modelagem climática. A partir de então, diferentes tipos de ações de adaptação podem ser propostas e priorizadas, de acordo com o grau de aceitação do risco baseado em estimativas de custo em curto, médio e longo prazo. Ao considerar a real dimensão dos riscos associados aos potenciais impactos do clima futuro, poderá haver a redução da vulnerabilidade e aumento da capacidade adaptativa não somente da infraestrutura rodoviária, mas da infraestrutura de transporte, como um todo, no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO, 2015. AASHTO Overview. Website. Disponível em: <http://www.transportation.org/Pages/Organization.aspx>
- AUSTROADS, 2004. Impact of Climate Change on road infrastructures. **National Library of Australia** 1a Edição ISBN 0 85588 692 7.
- BANA E COSTA, C.A.; VANSNICK, J.C., 1997. **Through a theoretical framework for measuring attractiveness by categorical based evaluation technique (MACBETH)**. In: Clímaco, j. (ed), *Multicriteria Analysis*, Springer-Verlag, Serlin.
- _____. **MACBETH – An interactive path towards the construction of cardinal value functions**. *International Transactions in Operational Research*, 1, p. 489-500, 1994.
- _____. **Uma nova abordagem ao problema da construção de uma função de valor cardinal: MACBETH**. *Investigação Operacional*, v. 15, p. 15-35, 1995.
- 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.
- BRANDIMARTE LEAL, B. A, 2013. **Análise da Relação das Características das Rodovias e Vias Urbanas com as Causas de Acidentes**. Projeto de Graduação. UFRJ. Rio de Janeiro.
- BRASIL. Departamento Nacional de Rodagem Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, 1998. **Manual de Reabilitação de pavimentos asfálticos. Divisão de Capacitação Tecnológica**. Rio de Janeiro, 234p (IPR. Publ., 704).
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa, 2006. **Manual de estudos de tráfego**. Rio de Janeiro, 384 p. (IPR. Publ., 723).
- BRASIL, 2014. Plano CNT de Transporte e Logística 2014. Brasília: Confederação Nacional dos Transportes.
- CNT, 2014. **Pesquisa CNT de rodovias 2014: relatório gerencial**. CNT/SEST/SENAT. Brasília/DF. 388p.
- COCHRAN, I., 2009. Climate Change Vulnerabilities and Adaptation possibilities for transport infrastructures in France. **Climate Report Research**. Issue n°18
- CRUZ, T. R. P. V., 2007. **Causas e Consequências da Limitação da Cabotagem na Costa Brasileira: Uma avaliação Hierárquica no trecho Manaus - Santos**. Dissertação de Mestrado em Transportes. UNB, Brasília/DF.
- DNIT, 2003. **NORMA DNIT 006/2003 – PRO. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos – Procedimento**. Diretoria de Planejamento e Pesquisa / IPR. Rio de Janeiro. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT006_2003_PRO.pdf.
- DNIT, 2006. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. DNIT. Rio de Janeiro: IPR, 2006. 310 p.
- DNIT. 2007. **Terminologias rodoviárias usualmente utilizadas**. Ministério dos Transportes. Brasília/DF. 14 p.
- DNIT, 2010. **Produto 4 – Final da Fase 1. Fase 1 – Identificação e Proposição de Melhorias em Segmentos Críticos da Malha Rodoviária Federal do Dnit**. Laboratório de Transportes/Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 59 p. Florianópolis
- DNIT, 2011. **Relatório dos Levantamentos Funcionais das Rodovias Federais**. Consórcio Strata Engenharia LTDA/ RF Consultoria LTDA
- DOIGNON, J.P. 1984. Threshold representations of multiple semiorders - SIAM. **Journal of Algebraic Discrete Methods**, v. 8, p. 77-84, 1984.
- ECHVERRIA, J.A.S., 2011. **Avaliação do efeito de restaurações com fresagem e recapeamento nas condições funcional e estrutural de pavimentos com volume de tráfego médio**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS.
- EUROPEAN COMMISSION, 2012. **Impacts of Climate Change on Transport: A Focus on Road and Rail Transport Infrastructure**. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- FWHA, 2012. **Climate Change and Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework**.
- FWHA, 2015. **About Long-Term Pavement Performance. Federal Highway Administration Research and Technology Coordinating, Developing, and Delivering Highway Transportation Innovations**. Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov/research/tfhrc/programs/infrastructure/pavements/ltp/>
- 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**.

- GOMES, P. T., 2008. **Projetos Especiais: Logística e Gerenciamento**. Mercosul Line.
- GUGLIELMETTI, F.R., 2003. Comparação Teórica Entre Métodos de Auxílio a Tomada de Decisão por Múltiplos Critérios. In: XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Anais ... Ouro Preto**. 2003.
- HALLADAY, M., 1998. The Strategic Highway Research Program: An Investment That Has Paid Off. **Public Roads**. **March/April 1998 Vol. 61. No. 5.** Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/98marapr/shrp.cfm>.
- KEENEY, R.; RAIFFA, H., 1976. **Decisions with multiple objective; preferences and value trade-offs**. J. Wiley and Sons.
- 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
- LISBOA, M. V., 2003. **Aplicação do Método de Análise Hierárquica – MAH para auxílio à tomada de Decisão em Estudos de Alternativas de Traçado de Rodovias**. Anais do XVII congresso da ANPET. Recife.
- LAVORENTE, G.B., 2011. **Caracterização das Vias de Exportação de Soja do Estado do Mato Grosso**. Dissertação - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- MELLO, J. C. C. B. S. GOMES, E. G. LINS, M. P. E., 2002. Análise Multicritério da Presença da Universidade Federal Fluminense com o uso do Método Macbeth. **Revista Produção, v. 11, n. 2**, p. 53-67.
- 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.
- MINISTÉRIO DE TRANSPORTE, 2004. **Assessoria Técnica na área de avaliação de desempenho de pavimentos típicos brasileiros – Relatório Final**. Tomo I. Departamento de Infraestrutura de Transporte. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisa Rodoviária.
- MONTEIRO, P. F. O., 2011. **Classificação Funcional e Estudo de Características Técnicas de Vias Urbanas em João Pessoa/PB**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFPB. João Pessoa.
- 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.
- NJTPA – New Jersey Transportation Planning Authority, 2012. **Climate Change Vulnerability and Risk Assessment of New Jersey's Transportation Infrastructure**, April 2012.
- 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
- 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
- ROMERO, B. C., 2006. **Análise de Localização de Plataforma Logística: Aplicação ao caso do ETSP -Entrepósito Terminal de São Paulo CEAGESP**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos. USP: São Paulo.
- ROY, B.; BOUYSSOU, D., 1993. **Aide multicritère à la decision: méthodes et cas**. Economica, Paris.
- SAATY, T.L, 1991. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: McGraw-Hill Pub. Co., 367 p.
- SALOMON, V. A. P., 2004. **Desempenho da Modelagem do Auxílio à Decisão por Múltiplos Critérios na Análise do Planejamento e Controle da Produção**. Tese de Doutorado em Engenharia. USP. São Paulo.
- SNV - Sistema Nacional de Viação. 2015. **Plano Nacional de Viação e Sistema Nacional de Viação**. DNIT. Brasília/DF. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao>. Acessado em: Julho de 2015
- STERN, E. & ZEHAVI, Y. 1990. Road safety and hot weather: a study in applied transport geography. **Trans. Inst. Brit. Geog., 15**: 102–111
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – TRB, 2010. **Highway Capacity Manual. National Research**. Council. Washington, DC
- USDOT – U.S. Department of Transportation. 2008. **Impacts of Climate Change and Variability on Transportation Systems and Infrastructure**. Gulf Coast Study.



Projeto PPE 18773

PRODUTO 4

Prof. Emilio Lèbre La Rovere

Coordenador do Projeto

Prof. Maurício Cardoso Arouca

Coordenador do Programa de Planejamento Energético

Prof. Fernando Alves Rochinha

Diretor Superintendente da Fundação COPPETEC