



Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Recursos Naturais da Amazônia

MODELO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA ESTIMATIVA DO DESMATAMENTO CONSIDERANDO A REDE DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO DO ESTADO DO PARÁ

Patricia Bittencourt Tavares das Neves

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientadores: Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.
Prof. André Augusto Azevedo Montenegro Duarte, D.Sc.

Belém
Janeiro / 2022

MODELO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA ESTIMATIVA DO DESMATAMENTO CONSIDERANDO A REDE DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO DO ESTADO DO PARÁ

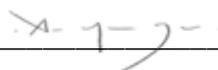
Patricia Bittencourt Tavares das Neves

TESE DE DOUTORADO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA, ITEC, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

Aprovada por:



Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.



Prof. André Augusto Azevedo Montenegro Duarte, D.Sc.



Prof. André Luiz Amarante Mesquita, Ph.D.



Prof. Augusto César de Mendonça Brasil, D.Sc.



Prof. Alan Cavalcanti da Cunha, D.Sc.



Prof. Nélio Moura de Figueiredo, D.Eng.

Belém – Pará – Brasil

Janeiro / 2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos
pelo(a) autor(a)**

- N511m Neves, Patricia Bittencourt Tavares das.
Modelo de inteligência artificial para estimativa do
desmatamento considerando a rede de transporte
rodoviário do estado do Pará / Patricia Bittencourt Tavares
das Neves.
— 2022.
xv, 120 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Claudio José Cavalcante
Blanco Coorientador(a): Prof. Dr. André Augusto
Azevedo
Montenegro Duarte
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Recursos Naturais na Amazônia,
Belém, 2022.
1. Rede rodoviária. 2. Rede rodoviária clandestina.
3. Amazônia. 4. Desmatamento. 5. Aprendizado
de máquinas. I. Título.

CDD 388.0981

Dedico aos meus pais, Gentil e Marluce,
e a minha filha, Maria Luísa.

AGRADECIMENTOS

A Deus, criador do universo e inteligência suprema, por todas as bênçãos recebidas durante minha existência.

Aos meus pais, Gentil e Marluce, por todo amor e dedicação que sempre dispensaram a mim.

Ao meu tesouro mais precioso, minha filha, Maria Luísa, e aos meus sobrinhos maravilhosos e queridíssimos, Filipe, Mateus, Isabela e Beatriz, pelo carinho, apoio e colaboração.

Ao meu irmão Paulo, pelo incentivo e amizade.

Aos meus orientadores, amigos muito queridos, inspiradores e professores exemplares Claudio Blanco e André Montenegro.

À Universidade Federal do Pará, aos amigos Fernando, Marcelo e Gabrielle e aos colegas da Faculdade de Engenharia Civil.

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFPA como parte dos requisitos necessários a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais (D.Eng.)

MODELO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA ESTIMATIVA DO DESMATAMENTO CONSIDERANDO A REDE DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO DO ESTADO DO PARÁ

Patricia Bittencourt Tavares das Neves

Janeiro/2022

Orientadores: Claudio José Cavalcante Blanco

André Augusto Azevedo Montenegro Duarte

Área de Concentração: Transformação de recursos naturais

Desde a década de 1950 a matriz de transporte amazônica, assim como de todo o Brasil, priorizou o modal rodoviário sem considerar a potencialidade hidroviária da Amazônia. Estudos anteriores indicam que o sistema rodoviário, formado pela rede viária regulamentada integrada a uma vasta rede clandestina, tem forte relação espacial com o desmatamento da floresta. Assim, o objetivo do trabalho é realizar uma análise quantitativa das variáveis relacionadas ao processo de desmatamento da floresta Amazônica, no período de 1988 a 2018. A área de estudo é o território do estado do Pará, localizado na Amazônia Oriental, segundo maior estado do Brasil em extensão territorial e o mais desmatado. O recurso matemático utilizado foi inteligência artificial com aplicação da técnica de aprendizado de máquinas (*machine learning*). Utilizaram-se variáveis quantitativas relacionadas à infraestrutura de transportes, variáveis sociais e econômicas, e como variável ambiental, a área desmatada. Foram testados três modelos e o algoritmo *Random Forest* apresentou o melhor desempenho. Com a função gerada, foi estimada a área desmatada para os anos de 2020, 2030, 2040 e 2050. Utilizou-se análise de sensibilidade para estimar a área desmatada com a implantação da BR-163 e BR-210, na região Norte do Pará. Os resultados demonstram que, mantendo-se o cenário atual, o desmatamento ainda será intenso nas próximas três décadas, com 25,77% de crescimento em relação à área atual, embora com taxas decenais decrescentes e a estimativa de área desmatada promovida pela implantação das rodovias federais é de 4.703,43 km² a 6.567,48 km².

Palavras-Chave: Rede rodoviária; Rede rodoviária clandestina; Desmatamento; Amazônia; Aprendizado de máquinas.

Abstract of Thesis presented do PRODENA/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D. Eng.)

ARTIFICIAL INTELLIGENCE MODEL FOR ESTIMATING DEFORESTATION CONSIDERING THE ROAD TRANSPORT NETWORK IN THE STATE OF PARÁ

Patricia Bittencourt Tavares das Neves

January/2022

Since the decade of 1950s the Amazonian and Brazilian transportation complex prioritized the model of road transport. Past studies point that the regular roadway system that is integrated to a clandestine roadway complex is strongly related to the Amazon forest deforestation. Thus, in this work we performed a quantitative analysis of the variables related to the process of deforestation of the Amazon forest, a natural resource of great environment and economic significance, and the socioeconomic development of the region in the period between 1988 and 2018. The geographical study area is the state of Pará, located in the Oriental Amazon, the second largest state of Brazil in territorial extension and the most devastated. We used machine learning in the modeling of the quantitative variables related to the transportation infrastructure, social variables and economic variables, e.g., the devastated area. The random forest model presented the best performance with the generated function (using least squares method). It was estimated the devastated area for the years of 2020, 2030, 2040 and 2050. Sensitivity analysis was used to evaluate the devastated area after the implementation of the roads BR-163 and BR-210 in the north of Pará. The results show that given the current scenario the devastation tends to continue intensively in the next three decades, with a 25.77% increase over the current region albeit with decreasing ten-year rates of forestation loss, and the estimation of the deforested area caused by the implementation of federal roadway networks goes from 4,703.43 km² to 6,567.48 km².

Keywords: Official roadway network; Clandestine roadway network; Deforestation; Amazon; Machine Learning

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mapa da Amazônia Legal.....	25
Figura 2.2 - Limites do bioma Amazônia e Amazônia Legal.....	26
Figura 2.3 - Desmatamento anual na Amazônia Legal no período de 1988 a 2020.....	28
Figura 2.4 - Amazônia Legal, Bioma Amazônico e Arco do Desmatamento.....	29
Figura 2.5 - Organização do Grupo Permanente de Trabalho Interministerial.....	30
Figura 2.6 - Desmatamento anual no estado do Pará no período de 1988 a 2020.....	35
Figura 2.7 - Área desmatada do estado do Pará.....	35
Figura 2.8 - Previsão realizada em 07/10/21 sobre os municípios do estado do Pará com maior risco desmatamento.....	36
Figura 3.1 - Mapas dos Planos de Transporte (a) Plano Catrambry, de 1926; (b) Plano Schnoor, de 1927 e (c) Plano Rodoviário do DNER, de 1937.....	41
Figura 3.2 - Plano Geral de Viação Nacional de 1934.....	43
Figura 3.3 - Mapa rodoviário do estado do Pará.....	47
Figura 3.4 - Municípios da Calha Norte do estado do Pará.....	48
Figura 3.5 - Cidades da Amazônia que mais desmataram entre julho de 2019 e agosto de 2020.....	51
Figura 3.6 - Traçado da rodovia BR-163.....	52
Figura 3.7 - Rodovias Federais da mesorregião do Baixo Amazonas.....	54
Figura 4.1- Exemplo de expressão gênica de fermento biológico processada por análise de componentes principais.....	59
Figura 4.2 - Representação do modelo <i>Random Forest</i>	61
Figura 5.1 - Mapa de localização do estado do Pará.....	65
Figura 5.2 - Fluxograma com as etapas do modelo.....	67
Figura 5.3 - Registros do satélite <i>Landsat</i> da malha rodoviária clandestina.....	69
Figura 5.4 - Etapas do algoritmo <i>Random Forest</i>	76
Figura 6.1 - Matriz de correlação de Pearson.....	77
Figura 6.2 - Matriz de correlação de Spearman.....	78
Figura 6.3 - Modelo <i>Decision Trees</i> da área desmatada.....	79
Figura 6.4 - Erro absoluto do modelo <i>Decision Trees</i> entre áreas desmatadas real e prevista.....	80
Figura 6.5 - Modelo <i>K-Nearest Neighbor</i> da área desmatada.....	81
Figura 6.6 - Erro absoluto do modelo <i>K-Nearest Neighbor</i> entre áreas desmatadas real e prevista.....	81
Figura 6.7 - Modelo <i>Random Forest</i> da área desmatada	82

Figura 6.8 - Erro absoluto do modelo <i>Random Forest</i> entre áreas desmatadas real e prevista.....	83
Figura 6.9 - Percentual de importância das variáveis para previsão da área desmatada.....	84
Figura 6.10 - Modelagem e estimativa da área desmatada no estado do Pará até 2050.....	85
Figura 6.11 - Modelagem e estimativa da área desmatada no estado do Pará até 2050 baseado no modelo de Holt-Winters	86
Figura 6.12 - Estrada clandestina. Registro realizado em operação contra o desmatamento em 13/08/2019.....	89
Figura 6.13 - Efeito da rede rodoviária e rede rodoviária clandestina na área desmatada.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Participação territorial dos países que compõem a Amazônia.....	23
Tabela 3.1 - Portfólio dos projetos do PNLT/2011 para o estado do Pará.....	55
Tabela 5.1 - Valores das variáveis no período de 1988 a 2018.....	75
Tabela 6.1 - Comparativo entre os modelos avaliados.....	83
Tabela 6.2 - Estimativa da área desmatada no estado do Pará.....	87
Tabela 6.3 - Previsão percentual de território a ser desmatado.....	87
Tabela 6.4 - Erros de previsão do modelo Holt-Winters considerando o ano de 2020.....	88
Tabela 6.5 - Estimativa de desmatamento considerando critérios variados.....	88
Tabela 6.6 - Representação do cálculo do efeito da área desmatada com a variação da rede rodoviária clandestina considerando uma variação de 10%.....	90
Tabela 6.7 - Representação do cálculo do efeito da área desmatada com a variação da rede rodoviária considerando uma variação de 5%.....	91
Tabela 6.8 - Valores do efeito médio das análises de sensibilidade.....	91
Tabela 6.9 - Previsão de desmatamento devido à rede rodoviária.....	93
Tabela 6.10 - Previsão de desmatamento devido a rede rodoviária clandestina...	94
Tabela 6.11 - Cenários de desmatamento considerando as rodovias BR-163 e BR-210.....	94

NOMENCLATURA

AD	Área Desmatada
ANA	Índice de Analfabetismo
AP	Área Protegida
APP	Área de Proteção Permanente
CNT	Confederação Nacional de Transporte
DETER	Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EXP	Exportação
GPTI	Grupo Permanente de Trabalho Interministerial
HOM	Homicídios
IA	Inteligência Artificial
ICMBio	Instituto Chico Mendes
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMAZON	Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia
INCRA	Instituto Nacional da Colonização e Reforma Agrária
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudança do Clima da ONU
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MMA	Ministério do Meio Ambiente
PIB	Produto Interno Bruto
PNLT	Plano Nacional de Logística e Transportes
POP	População
PPCDAm	Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal

PRODES	Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite
SNV	Sistema Nacional de Viação
SAD	Sistema de Alerta de Desmatamento
RDC	Rede Rodoviária Clandestina
RDPC	Renda Domiciliar Per Capita
RR	Rede Rodoviária
RF	<i>Random Forest</i>
RR	Rede Rodoviária
TD	Taxa de Desemprego
TI	Terra Indígena
TQ	Território Quilombola
UC	Unidade de Conservação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação e Hipóteses da Pesquisa	20
1.2	Objetivos	21
1.2.1	Objetivo Geral.....	21
1.2.2	Objetivos Específicos	21
1.3	Estrutura da Tese	22
2	A AMAZÔNIA E O DESMATAMENTO	23
2.1	Região Amazônica.....	23
2.2	Desmatamento da Amazônia	26
2.2.1	Sistemas de Monitoramento.....	29
2.2.2	Principais Fatores do Desmatamento.....	32
2.2.2.1	Extração Madeireira	32
2.2.2.2	Agricultura e Pecuária.....	33
2.2.2.3	Mineração.....	34
2.3	Desmatamento no Estado do Pará	34
3	TRANSPORTE NA AMAZÔNIA.....	38
3.1	Infraestrutura Rodoviária	40
3.2	As Estradas e o Desmatamento na Amazônia	43
3.2.1	Rede Viária Clandestina.....	45
3.3	Rodovias Previstas para a Calha Norte	46
3.3.1	Rodovia Federal BR-163.....	48
3.3.2	Rodovia Federal BR-210.....	52
3.4	Planejamento da Infraestrutura de Transporte no Pará	54
4	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, APRENDIZADO DE MÁQUINAS (<i>machine learning</i>) E MÉTODOS UTILIZADOS.....	56
4.1	Aprendizado de Máquinas	56
4.1.1	Aprendizado Supervisionado	58
4.1.2	Aprendizado Não Supervisionado.....	58

4.1.3	Métodos <i>Ensemble</i>	60
4.2	<i>Random Forest</i>	60
4.3	Coeficiente de Correlação de Pearson	63
4.4	Coeficiente de Correlação de Spearman	64
5	METODOLOGIA.....	65
5.1	Área de Estudo	65
5.2	Etapas do Modelo	66
5.3	Seleção das Variáveis Independentes	67
5.4	Caracterização da Rede de Transporte	68
5.5	Variáveis Socioeconômicas, de Infraestrutura e Ambiental	70
5.5.1	Coleta de Dados.....	70
5.5.1.1	Extensão da Rede Rodoviária	71
5.5.1.2	Extensão da Rede Rodoviária Clandestina.....	71
5.5.1.3	Área Desmatada	72
5.5.1.4	População Residente	72
5.5.1.5	Renda Domiciliar Per Capita Média.....	73
5.5.1.6	Taxa de Desemprego.....	73
5.5.1.7	Homicídios.....	73
5.5.1.8	Produto Interno Bruto (PIB)	73
5.5.1.9	Exportações	74
5.5.1.10	Analfabetos.....	74
5.5.2	Banco de Dados	74
5.6	Algoritmo <i>Random Forest</i>	75
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
6.1	Coeficientes de Correlação das Variáveis	77
6.2	Previsão da Área Desmatada, Erro Médio Absoluto e Desvio Padrão	78
6.2.1	Modelo <i>Decision Trees</i>	79
6.2.2	Modelo <i>K-Nearest Neighbor</i>	80
6.2.3	Modelo <i>Random Forest</i>	82

6.3	Percentual de Importância das Variáveis.....	83
6.4	Estimativa de Área Desmatada até 2050.....	84
6.5	Previsão de Desmatamento na Região da Calha Norte.....	89
6.5.1	Análise de Sensibilidade	89
6.5.2	Estimativa da Área Desmatada Considerando o Efeito Médio	93
6.6	Considerações Finais	94
7	CONCLUSÕES	96
7.1	Sugestão para Estudos Futuros.....	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
	APÊNDICE A – Árvore de decisão criada por um conjunto de dados.....	119
	APÊNDICE B – Finalização do treinamento <i>Random Forest</i>	120

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia, maior floresta tropical do mundo, conta com diferentes interesses de ocupação em consonância com os processos de colonização, exploração e integração desde a chegada dos europeus no século XVI. Nesse caso, o processo de ocupação do território brasileiro esteve intimamente vinculado à navegação e a utilização do transporte hidroviário, o qual esteve ainda mais presente na Amazônia (LIMA NETO *et al.*, 2001; MARIN, 2004). No processo de colonização, a malha hidroviária exerceu um papel de indução na formação das cidades, visto que as maiores e mais representativas cidades amazônicas estão localizadas às margens de rios, sendo, naturalmente, cidades aquaviárias com as sedes às margens de rios ou próximas ao mar.

Os processos de exploração e integração foram e ainda atuam como indutores do transporte na região amazônica, ainda que de forma arbitrária. No século XIX, durante o ciclo da borracha, ocorreu a abertura do rio Amazonas para a navegação internacional, com o apoio das companhias de navegação fluvial paraense (Belém) e fluvial do alto Amazonas (Manaus), além da intermodalidade no escoamento da borracha boliviana e brasileira pela Estrada de Ferro Madeira Mamoré até Porto Velho (MARIN, 2004). Essas atividades desempenharam um papel importante no desenvolvimento da região amazônica neste período.

A partir da década de 1930, o transporte rodoviário começa a ser visto como alternativa mais adequada para efetivação de capacidade e maior abrangência espacial da malha de transportes (HUERTAS, 2018). Na Amazônia, as rodovias federais surgiram a partir de 1960 e elas foram concebidas com a proposta de promover a integração da região amazônica com o restante do país, pois se entendia que a solução dos problemas sociais e econômicos da região amazônica viria por meio do desenvolvimento regional, e este por meio da expansão do sistema rodoviário (MARIN, 2004).

Assim, com o lema “ocupar para não entregar” e o propósito de integrar a Amazônia, os governos militares brasileiros iniciaram as construções das grandes rodovias nas décadas de 1960 e 1970 e, neste mesmo período, foram iniciados os processos de exploração de minérios, colonização agropecuária e o desmatamento ilegal. Para Abreu, Duarte e Ribeiro (2005) e Nobre *et al.* (2016), o modelo de desenvolvimento implementado na Amazônia nos últimos 50 anos, baseado no desmatamento, não resultou em geração de riqueza e nem melhor qualidade de vida para os amazônidas.

Em relação aos fatores que influenciam o desmatamento na Amazônia, alguns trabalhos indicam como agentes determinantes: a construção de rodovias, as estradas não-oficiais (BRANDÃO; SOUZA, 2006; MOREIRA *et al.*, 2007; BARBER *et al.*, 2014); melhorias da infraestrutura, como hidrelétricas, e a construção de gasodutos, que geralmente envolve uma via de acesso de acompanhamento, pelo menos durante a fase de construção e isso pode levar à entrada de migrantes (FEARNSIDE, 2002). A pecuária, o aumento da população regional e o avanço da fronteira agrícola são outras razões determinantes. No entanto, é a combinação desses e possivelmente outros fatores, aqui não relacionados, e suas interdependências que impulsionam o desmatamento (BROWN *et al.*, 2016; VERBURG *et al.*, 2014).

No que concerne aos estudos que relacionam o modelo de desenvolvimento implementado na Amazônia, as transformações ambientais e seus desdobramentos sobre o bem-estar social, Prates e Bacha (2010) afirmam que esses estudos abrangem mudanças climáticas, gestão de águas, políticas de conservação e poluição internacional. Carvalho *et al.* (2020) avaliaram a externalidade decorrente da perda da atividade pesqueira afetada pela construção de usina hidrelétrica e concluíram que o custo final considerado num projeto de geração de energia é inferior ao valor real porque os impactos não são avaliados de forma adequada e a contaminação dos rios é avaliada como um enorme prejuízo para a região.

Quanto ao garimpo, pesquisa realizada por Lobo *et al.* (2017) sobre a contaminação da população, por mercúrio (Hg), presente nos peixes do rio Tapajós, indicou que nesta região da Amazônia, a contaminação por Hg ocorre após o desmatamento e a erosão, que drena sedimentos do solo nas vias navegáveis. Os autores ainda afirmaram que, a mineração artesanal e de pequena escala de ouro (ASGM), na região amazônica, gerou vários impactos ambientais, como contaminação por mercúrio e alterações na qualidade da água devido ao aumento do assoreamento. Outras pesquisas em andamento indicam que os efeitos dos rejeitos de mineração no ambiente aquático estão ocorrendo em vários rios da bacia do rio Amazonas (LOBO *et al.*, 2017; PASSOS *et al.*, 2009).

Da Cunha *et al.* (2021) simularam processos de dispersão de óleo em cenários de prováveis acidentes com navios que trafegam em rotas marítimas interligadas a portos amazônicos e apontou que o risco de acidentes é uma realidade constante, tanto nos processos de extração ou durante o transporte de petróleo bruto e seus derivados, e que, as áreas urbanas e ecossistemas costeiros próximos podem ser ameaçados por eventuais acidentes de derramamento de óleo, cujos potenciais impactos ambientais requerem a adoção de medidas de ações de controle do navio, planejamento inteligente, fiscalização e monitoramento não disponíveis na região.

Da Cunha *et al.* (2021) ressaltam que grandes navios de transporte de passageiros ou cargueiros com cargas perigosas também representam alto risco de acidentes com elevadas cargas de combustível para sua própria propulsão, até mais graves que os tanques com combustíveis menores e que o excesso de velocidade, fora dos limites regulamentares, é um fator de risco. Para a segurança e sustentabilidade do tráfego das embarcações é fundamental o respeito às normas de navegação, cuidados com as comunidades ribeirinhas e recursos naturais, principalmente quanto à sensibilidade ao óleo nos litorais. Além da ameaça do derramamento de óleo e combustíveis, outro fator de risco é o perigo da água de lastro dos navios (PEREIRA *et al.*, 2014).

No contexto de infraestrutura de transporte versus desenvolvimento dos centros polarizadores, existem alguns entraves relacionados ao potencial hídrico e aos grandes projetos, que compreendem a indústria de transformação, a agroindústria, a pecuária, a exploração mineral, a exploração madeireira, as hidrelétricas e a exploração de gás e petróleo. Os principais polos de desenvolvimento econômico na região Amazônica estão ligados pela rede hidroviária, sendo, portanto, o transporte aquaviário fator importante para o desenvolvimento da região. Pinheiro (2018) considera como grandes limitadores do desenvolvimento da região as dificuldades de acesso e as deficiências energéticas, ressaltando a importância de soluções sustentáveis, sugere maiores investimentos em hidrovias ao invés de construção de rodovias.

A importância de informações georreferenciadas sobre infraestrutura de estradas foi ressaltada por Meijer *et al.* (2018), que levantou um conjunto de dados de 222 países e utilizou modelo matemático para estimar a extensão rodoviária no ano de 2050. O estudo considerou variáveis sociais e econômicas, concluindo que é importante um conjunto de dados precisos sobre a infraestrutura rodoviária para o planejamento e redução dos impactos no ecossistema da Amazônia, e que os maiores aumentos na extensão de estradas estão previstos para os países em desenvolvimento em áreas do mundo como Amazônia, bacia do Congo e Nova Guiné.

A rápida proliferação de estradas também foi apontada por Laurance *et al.* (2017) como uma das maiores responsáveis pela devastação das florestas tropicais da África. Embora a expansão da rede rodoviária seja associada ao desenvolvimento socioeconômico das populações, Ibisch *et al.*, (2016); Laurance *et al.* (2015, 2017) e Trombulak e Frissell (2000) descrevem os efeitos nocivos da expansão dos sistemas de transporte por rodovias em florestas tropicais e ressaltam a importância, para a conservação das florestas, de evitar a construção de novas estradas em áreas sem estradas ou com estradas escassas. Souza Jr *et al.* (2020) afirmam que as estradas oficiais são o principal ponto de expansão das estradas não oficiais e que, na Amazônia

brasileira, a paisagem sem estradas tem desmatamento muito menor. Os autores ressaltam que as estradas aumentam o risco de desmatamento, ocasionam fragmentação da floresta e incêndios, além de ameaçar as comunidades locais e indígenas. Trombulak e Frissell (2000) vão além, quando sugerem a remoção das estradas existentes para beneficiar a biota terrestre e aquática.

A denominação de indicadores socioeconômicos mais representativos para um estudo do impacto da política de transporte no desenvolvimento da região amazônica é pouco conhecida. Pfaff *et al.* (2008) abordam os impactos de estradas na Amazônia brasileira, ressaltando que a perda de floresta não é seu único impacto e que, embora os investimentos em novas estradas aumentem o desmatamento, deve-se reconhecer que esta não é a única consideração, pois há inúmeros impactos de estradas no ecossistema amazônico e no bem-estar humano.

Na ausência de desmatamento, normalmente as rodovias geram perda de qualidade de habitat para a fauna. Os meios que geram essa perda de qualidade são distintos e difíceis de serem isolados, como ruído, luminosidade ou poluição do ar. Se a perda de condições de habitat das espécies for severa, a área afetada pela rodovia pode tornar-se completamente imprópria para algumas espécies (RIBEIRO, 2021).

O Painel Intergovernamental de Mudança do Clima da ONU (IPCC, 2021) publicou relatório assinado por 234 cientistas, de 65 países e alertou ser inequívoco e inquestionável que a influência humana aqueceu a superfície terrestre, a atmosfera e os oceanos, já que o aquecimento observado provavelmente deriva de ações como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento, sendo os impactos do aquecimento global graves e irreversíveis. O IPCC (2021) também ressaltou que os extremos de calor observados na última década são provenientes dessas ações e que se nada for feito, o colapso climático é iminente. De acordo com o Observatório do Clima (2021) foi a primeira vez que o IPCC quantificou as responsabilidades das ações humanas no aumento da temperatura. Todo esse contexto reitera a necessidade e a importância da preservação da Amazônia para sustentabilidade do planeta e demonstra a relevância de políticas públicas, elaboração de estudos e ações efetivas que devem ser implementados para o combate ao desmatamento.

A proposta deste trabalho é estudar a influência da malha rodoviária (oficial e clandestina) no processo de desmatamento no estado do Pará e realizar previsões de desmatamento, a partir de cenários de expansão da rede rodoviária, alertando para as ameaças dessa modalidade de transporte na região. No estudo foi considerado a série histórica para o período compreendido entre 1988 a 2018 e utilizado como recurso computacional inteligência artificial, com a aplicação de algoritmos de aprendizado de máquinas para a elaboração do modelo, que permitiu, com uso de outros métodos

matemáticos, como análises de regressão e análise de sensibilidade, realizar previsões decenais de desmatamento no estado do Pará e estimar a área a ser desmatada na região da Calha Norte, em decorrência da implantação das rodovias BR-163 e BR-210, atualmente em fase de planejamento.

1.1 Motivação e Hipóteses da Pesquisa

Nos últimos anos, a curva de desmatamento na Amazônia Legal vem apresentando um crescimento preocupante, a partir do ano de 2019 a taxa anual de desmatamento ultrapassa o valor de 10.000 km² (INPE, 2021a), algo que não acontecia desde 2008. A literatura fornece vários exemplos sobre os fatores, variáveis e agentes relacionados ao desmatamento da floresta Amazônica, assim como discussões e proposições para o combate ao desmatamento. Nesse contexto, a malha rodoviária é reconhecidamente um fator que contribui para o desmatamento, mesmo porque ela estimula o surgimento de estradas clandestinas utilizadas para o escoamento da madeira ilegal e a circulação de predadores da floresta. Considerando a formação acadêmica da autora no setor de transportes, a escassez de estudos e informações que relacione de forma quantitativa a influência da infraestrutura rodoviária na área desmatada; considerando que o estado do Pará é o mais desmatado da Amazônia Legal; considerando também os projetos recentemente anunciados de expansão e recuperação rodoviária no Pará; esta Tese foi desenvolvida visando contribuir com elementos para elaboração de políticas públicas no combate ao desmatamento na Amazônia, portanto, tem-se as seguintes questões:

- i. Qual a influência da malha rodoviária total existente e variáveis socioeconômicas como PIB, população e renda média no desmatamento do estado do Pará?
- ii. Como relacionar a extensão da malha rodoviária com a área desmatada? É possível dimensionar índices que representem essa relação?
- iii. A expansão da infraestrutura rodoviária e a conservação da floresta são propostas conflitantes para o estado do Pará?

Dessa forma, foram estabelecidas as hipóteses:

- i. A rede rodoviária existente no estado do Pará exerce significativa influência no desmatamento da Amazônia;

- ii. É possível estimar a área desmatada resultante do incremento da extensão da malha rodoviária.

Assim, pretende-se, com esta pesquisa, analisar o desmatamento na Amazônia, investigar os fatores, agentes e variáveis relacionados com a destruição da floresta; realizar consultas sobre o trabalho de entidades governamentais e não-governamentais que atuam no combate ao desmatamento e acompanhar as discussões sobre o tema; realizar reflexões sobre os impactos do desmatamento no planeta, aprofundar os estudos sobre os efeitos do sistema rodoviário na Amazônia, tais quais os impactos sociais decorrentes da construção das rodovias, como a violência aos povos indígenas e populações locais; conhecer sobre os sistemas de monitoramento, controles e plataformas disponíveis para o combate ao desmatamento; analisar como os governos reagiram ao processo de desmatamento no período de 1988 a 2018; e analisar as políticas implementadas que apresentaram resultados satisfatórios e que instrumentos e políticas devem ser implementados para que ocorra êxito nos compromissos ambientais assumidos pelo País.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Modelar por meio de inteligência artificial a influência da rede de transporte rodoviário, oficial e clandestina, no desmatamento da Amazônia, com indicadores que relacionem a extensão da malha rodoviária com a área desmatada no estado do Pará.

1.2.2 Objetivos Específicos

- i. Utilizar modelagem via inteligência artificial aplicando algoritmo *Random Forest* para análise da influência de variáveis socioeconômicas e de infraestrutura rodoviária no desmatamento e para a previsão de área desmatada;
- ii. Analisar a importância de variáveis sociais, econômicas e de infraestrutura no processo de desmatamento;
- iii. Realizar prognósticos da área de desmatamento para os anos de 2020, 2030, 2040 e 2050;
- iv. Efetuar estimativas de áreas desmatadas provocadas pela futura implantação de rodovias no estado do Pará.

1.3 Estrutura da Tese

A Tese é organizada em sete capítulos.

No primeiro capítulo é abordado o processo de ocupação da Amazônia para contextualização do problema do desmatamento. Entender o processo de ocupação da região a ser estudada e sua relação com a matriz de transportes, assim como, os fatores que contribuíram para o surgimento e expansão do sistema rodoviário, sendo fundamental para análise e elaboração de proposições. O capítulo, apresenta, ainda, a motivação e os objetivos da pesquisa.

O segundo capítulo descreve sobre as características gerais da Floresta Amazônica, com enfoque no desmatamento, apresenta as taxas de áreas desmatadas, os principais instrumentos e mecanismos utilizados para o combate ao desmatamento, assim como os sistemas de monitoramento e controle existentes e as principais atividades relacionadas ao desmatamento.

No terceiro capítulo informações gerais sobre o transporte na Amazônia são apresentadas, faz uma abordagem histórica sobre o planejamento dos transportes no país, descreve características da infraestrutura rodoviária clandestina existente e sobre as rodovias objetos do estudo, BR-163 e BR- 210. Ao final do capítulo, apresenta o portfólio do Plano Nacional de Logística e Transporte vigente para o estado do Pará e descreve sobre os projetos do Arco Norte.

O quarto capítulo apresenta um breve histórico sobre inteligência artificial e descreve sobre os recursos matemáticos e técnicas utilizadas para realização da Tese.

O quinto capítulo trata o método utilizado para realização da pesquisa, apresenta a área de estudo, as etapas do modelo, as variáveis utilizadas, o processo de coleta de dados e traz informações sobre o algoritmo de aprendizado de máquinas *Random Forest*.

No sexto capítulo temos os resultados do estudo com discussões, apresentação do modelo *Random Forest* e prognósticos para o desmatamento até 2050 estão dispostos, subsequente é mostrado os parâmetros da análise de sensibilidade empregada para definição do efeito do desmatamento a partir da rede rodoviária e a previsão de desmatamento caso sejam executados os trechos planejados para as rodovias BR-163 e BR-210, na Calha Norte.

No último capítulo são apresentadas as conclusões do estudo, com exposição dos resultados e recomendações de políticas públicas em consonância com os acordos internacionais firmados para a extinção do desmatamento ilegal. Nesse capítulo são discutidas sugestões para estudos futuros.

2 A AMAZÔNIA E O DESMATAMENTO

2.1 Região Amazônica

A Amazônia, território que abriga a maior floresta tropical do mundo, equivalente a 35% das áreas florestais do planeta, é um patrimônio natural de enorme valor ambiental e econômico, possuindo mais de 6,5 milhões de km² e estendendo-se pelos solos de nove países: Brasil, Bolívia, Peru, Equador, Colômbia, Venezuela, Guiana, Suriname e França (Guiana Francesa), sendo que o Brasil detém sua maior porção territorial, de 5,4 milhões de km² (IPEA, 2012) (Tabela 2.1). As informações sobre extensão e limites da Amazônia, denominada também de Pan-Amazônia e Amazônia Internacional, refere-se a todo esse complexo que envolve a maior floresta tropical e bacia hidrográfica do mundo.

Tabela 2.1 - Participação territorial dos países que compõem a Amazônia.

País	Área Total (km ²)	Participação na Amazônia (%)	Participação na Amazônia (km ²)	Valores percentuais (%)
Bolívia	1.098.581	36,23	398.015,90	5,69
Brasil	8.511.965	55,46	4.720.677,52	67,53
Colômbia	1.138.914	41,80	476.066,05	6,81
Equador	272.045	42,55	115.745,00	1,66
Guiana	215.083	100,00	215.083,00	3,08
Peru	1.285.216	59,10	759.562,66	10,87
Suriname	163.820	100,00	163.820,00	2,34
Venezuela	912.050	6,00	54.723,00	0,78
Guiana Francesa (*)	86.504	100,00	86.504,00	1,24
TOTAIS	13.684.178		6.990.197,13	100,00
Valores aproximados e adotados	13.700.000		7.000.000	

(*) Não é um país, mas sim um Departamento ultramarinho da França que está inserido no ambiente amazônico

Fonte: Duarte (2006)

O Brasil é constituído por seis biomas terrestres, sendo o amazônico o maior e o mais preservado, embora o Relatório Anual do Desmatamento no Brasil (AZEVEDO *et al.*, 2020), apresente que foi o bioma que teve maior devastação em 2019. Ao todo, cerca de 700.000 km² já foram desmatados, o que corresponde a 17% da cobertura original da floresta, sendo que 300.000 km² ocorreram nos últimos 20 anos (INPE, 2020). O bioma Amazônico ocupa uma área de 4.196.943 km², que corresponde a mais

de 40% do território nacional e é constituído principalmente por uma floresta tropical, abrigando um terço de toda a madeira tropical do mundo e 30 mil espécies de plantas (MMA, 2020). A Amazônia é formada por distintos ecossistemas como florestas densas de terra firme, florestas estacionais, florestas de igapó, campos alagados, várzeas, savanas, refúgios montanhosos e formações pioneiras.

A Amazônia Legal Brasileira foi instituída em 1953 para fins de planejamento econômico, por meio de Lei Federal (BRASIL, 1953). Os limites da Amazônia Legal foram definidos por um viés sociopolítico, que desconsiderou os limites geográficos, e embora tenha sofrido alterações ao longo do tempo, o conceito de Amazônia Legal manteve-se e considera que a região agrega os municípios que compartilham os mesmos desafios econômicos, políticos e sociais, baseados em análises estruturais e conjunturais; seus limites territoriais mantêm um viés sociopolítico e não geográfico, isto é, não são definidos pelo bioma Amazônia (Figuras 2.1 e 2.2). Inicialmente era formada pelos estados do Pará e Amazonas, os quais à época territórios federais do Acre, Amapá, Guaporé e Rio Branco e, ainda, a parte de Mato Grosso a norte do paralelo 16°, a porção de Goiás a norte do paralelo 13° e área do Maranhão a oeste do meridiano de 44° (BRASIL, 1953; OECO, 2020).

Atualmente, a Amazônia Legal Brasileira abrange os estados do Acre, Amazonas, Amapá, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins e Maranhão, ocupando 5.015.067,749 km², correspondente a cerca de 58,9% do território brasileiro (8.510.295,914 km²); em conformidade com a recente divulgação da malha municipal (IBGE, 2020), distribuídos da seguinte forma: Acre (22 municípios), Amapá (16), Amazonas (62), Mato Grosso (141), Pará (144), Rondônia (52), Roraima (15), Tocantins (139) e parte do Maranhão (181, dos quais 21 foram parcialmente integrados), totalizando 772 municípios (Figura 2.1). A participação do estado do Maranhão é de 79,3% do seu território (261.350,785 km²) integrado à área de abrangência da Amazônia Legal, apesar de ser o estado com o maior número de municípios (IBGE, 2020).

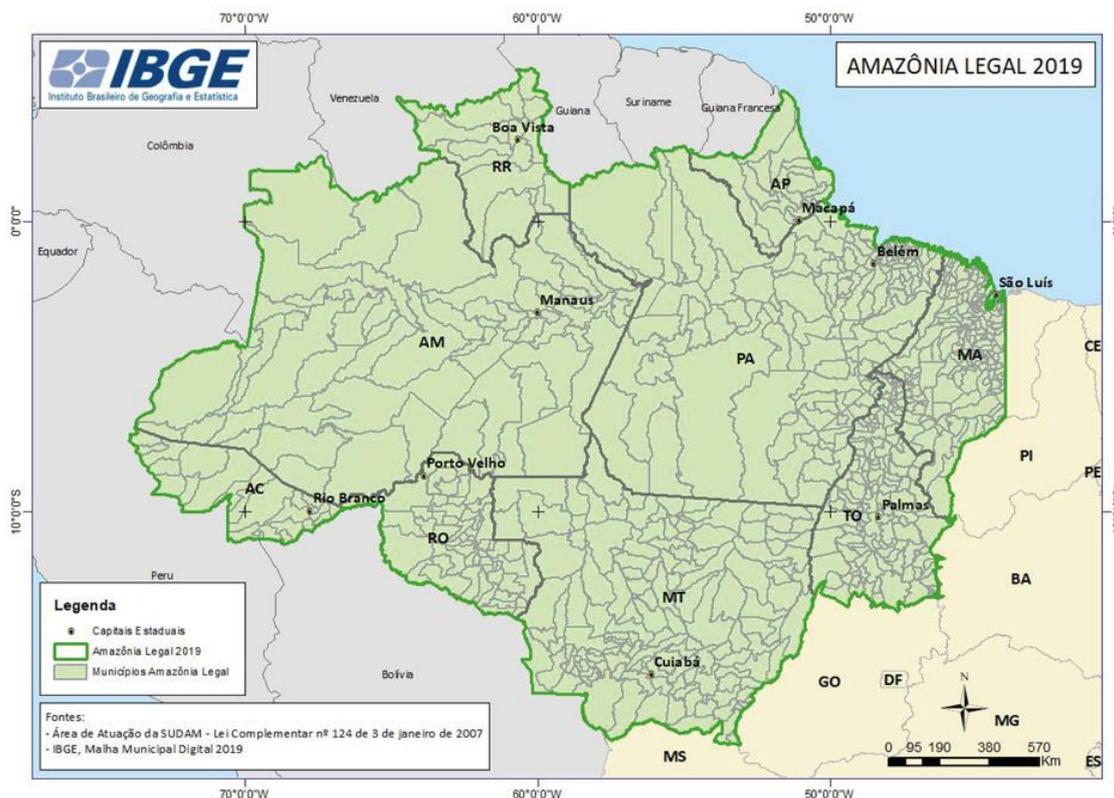


Figura 2.1 - Mapa da Amazônia Legal.
Fonte: IBGE (2019).

A maior bacia hidrográfica do mundo é a amazônica, que abrange cerca de 6 milhões de km² e tem 1.100 afluentes. Seu principal rio, o Amazonas, corta a região para desaguar no Oceano Atlântico, lançando ao mar cerca de 175 milhões de litros d'água a cada segundo. A sua extensa rede hidrográfica ocupa 40% do território nacional, possui além dos grandes rios, principais afluentes tributários navegáveis até grandes distâncias destes rios, o que permite a utilização de uma extensa rede de comunicação fluvial (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2006). Mesmo diante do potencial para o transporte hidroviário, esta macro região representa cerca de 8% do PIB brasileiro e 12% da população total, além de ter um PIB per capita cerca de 30% menor que a média nacional e salário médio 20% inferior à média do Brasil (PINHEIRO, 2018).

Pesquisa que analisou 45 indicadores socioambientais (IMAZON, 2021a), o Índice de Progresso Social (IPS), das 772 cidades da Amazônia Legal mostra que a destruição da floresta está associada ao baixo desenvolvimento e à pobreza. A pesquisa revelou que os 20 municípios com as maiores áreas de floresta destruídas nos últimos três anos tiveram IPS médio de 52,38, valor 21% menor que o índice do Brasil, de 63,29, e mais baixo que o da Amazônia, de 54,59 (IMAZON, 2021a).

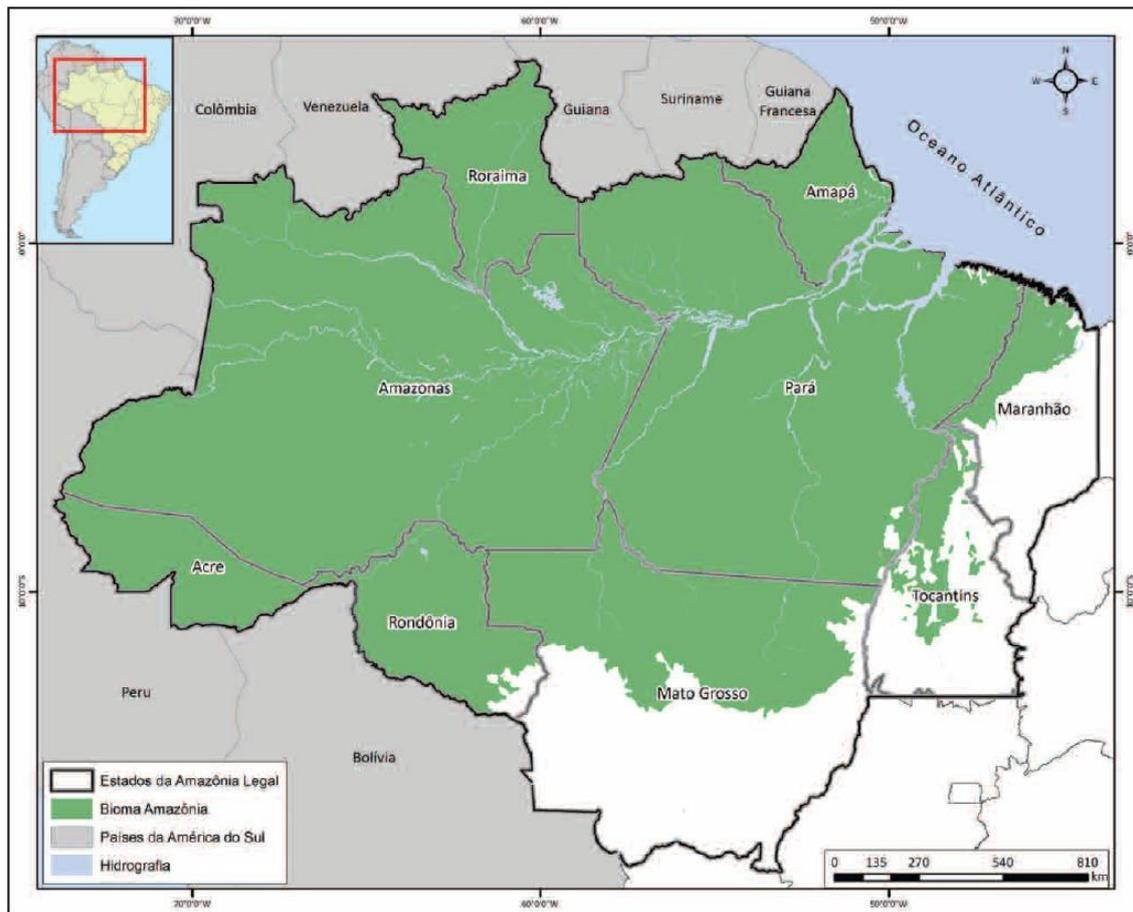


Figura 2.2 - Limites do bioma Amazônia e Amazônia Legal.
Fonte: IMAZON (2018).

2.2 Desmatamento da Amazônia

Desmatamento é a operação que objetiva a supressão total da vegetação nativa de determinada área para o uso alternativo do solo. Considera-se nativa toda vegetação original, remanescente ou regenerada e qualquer descaracterização que venha a suprimir toda a vegetação nativa deve ser interpretada como desmatamento (SANTOS, 2018). A degradação florestal é o resultado do conjunto de perturbações que ocorrem por influência humana e a despeito de a floresta continuar de pé enquanto no desmatamento, a floresta é removida e substituída por pasto, monocultura ou pelo simples abandono (IMAZON, 2021a; ROSA, 2013). A degradação é um fenômeno mais difícil de ser percebido, considerado um distúrbio parcial na floresta causado pela extração de madeira e/ou por queimadas florestais. O INPE (2020) considera como desmatamento a remoção completa da cobertura florestal primária por corte raso, independentemente da futura utilização destas áreas, e o desmatamento pode ser visto como um processo único, que se inicia com a floresta intacta e termina com a conversão completa da floresta original em outras coberturas.

O desmatamento é um enorme problema ambiental, que além de devastar as florestas e os recursos naturais, compromete o equilíbrio do planeta em seus diversos elementos, incluindo os ecossistemas, acarretando enormes prejuízos ambientais e econômicos. A expansão do agronegócio e pecuária é considerada a principal causa do aumento do desmatamento na Amazônia (RIVERO *et al.*, 2009; VIEIRA, 2019).

As mais altas taxas de desmatamento na Amazônia são registradas a partir do início da década de 1970, durante o processo de expansão da rede de transporte rodoviária. Somente em 1988 deu-se início ao Programa de Monitoramento por Satélite de Desmatamento na Amazônia Legal (PRODES), como resposta às pressões nacionais, internacionais e preparação para a demanda da Eco-92. Assim, as taxas de desmatamento registradas passaram a ser utilizadas pelo governo brasileiro para o estabelecimento de políticas públicas. O PRODES é desenvolvido pelo INPE, tem reconhecimento internacional e é aceito por toda comunidade científica (ARRAES; MARIANO; SIMONASSI, 2012; INPE, 2020).

O PRODES utiliza imagens de satélites da classe *Landsat* (20 a 30 metros de resolução espacial e taxa de revisita de 16 dias) de forma que busca minimizar o problema da cobertura de nuvens e garantir critérios de interoperabilidade. Inicialmente, o PRODES Analógico trabalhava com escala fixa, imagem impressa no papel, de 1:250.000. O PRODES já fez uso de imagens do satélite americano *Landsat-5/TM*, *LISS-3* do satélite indiano *IRS-1*, e também das imagens do satélite inglês *UK-DMC2*. Atualmente, o PRODES faz uso massivo das imagens do *Landsat 8/OLI*, *CBERS 4* e *IRS-2*. Independente do instrumento utilizado, a área mínima mapeada pelo PRODES é de 6,25 hectares. O PRODES disponibiliza dados oficiais de taxas de desmatamento anuais, coletados entre agosto e julho do ano seguinte, sendo, portanto, ineficientes para as ações de prevenção e fiscalização (COSTA, 2017; INPE, 2021a).

O desmatamento foi crescente do início da década de 90 até o ano de 2004. Em 1995, o desmatamento na Amazônia Legal foi de 29.059 km², a maior taxa anual registrada no período analisado e, após esse ano, a taxa anual vem apresentando diferentes oscilações decorrentes de diversas causas (Figura 2.3), tais como incêndios, comércio de madeira, expansão de atividade agropecuária, políticas públicas ambientais e incentivos fiscais (ARRAES; MARIANO; SIMONASSI, 2012; FEARNside, 2002; LAURANCE *et al.*, 2001)

O desmatamento na Amazônia é concentrado numa faixa identificada como “Arco do Desmatamento”, que compreende a região onde se encontram os maiores índices de desmatamento da Amazônia. A configuração espacial (Figura 2.4) abrange o oeste e noroeste do Maranhão; o leste, sul e parte do oeste do Pará; o oeste e norte do Tocantins; o leste, centro-oeste e norte do Mato Grosso, todo o estado de Rondônia,

parte do Acre e o sul do Amazonas (IMAZON, 2018). Para Souza Jr *et al.* 2020, o arco do desmatamento é consequência das primeiras rodovias implementadas, que cortaram florestas virgens com a proposta de conectar a região amazônica com o restante do Brasil, proporcionando uma nova fronteira de desenvolvimento, que foi iniciada com a pecuária, assentamentos agrários, extração de madeira e garimpeiros. “E no final da década de 1990, a nova fronteira de desmatamento consolidou-se ao longo da orla do bioma Amazônia com o bioma Cerrado, criando o chamado arco do desmatamento.” (SOUZA JR *et al.*, 2020).

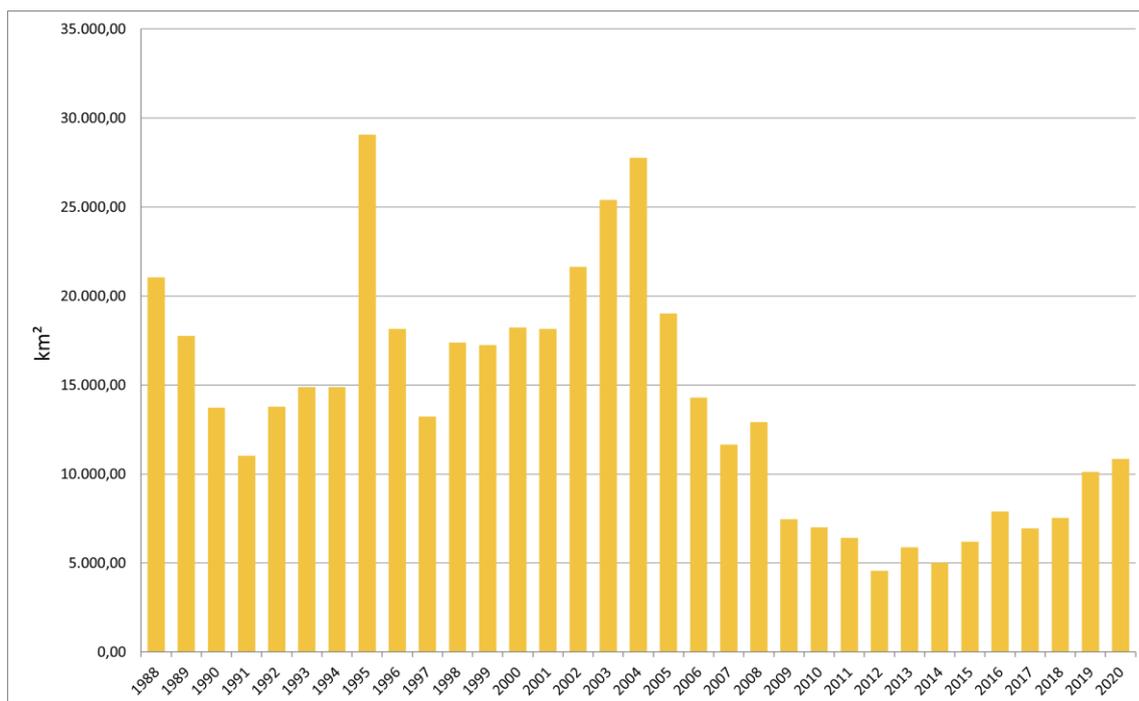


Figura 2.3 - Desmatamento anual na Amazônia Legal no período de 1988 a 2020.
Fonte: INPE (2021a).

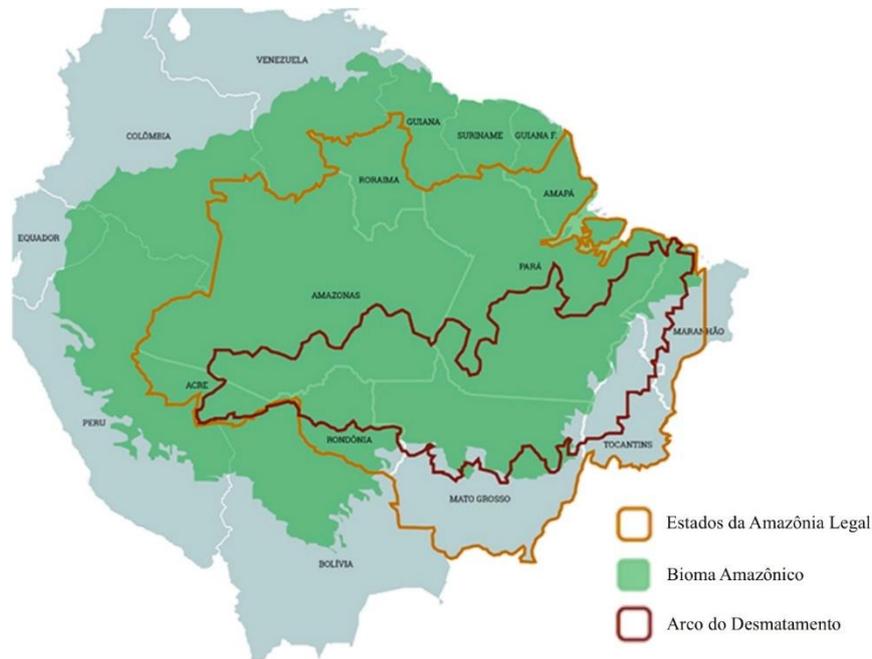


Figura 2.4 - Amazônia Legal, Bioma Amazônico e Arco do Desmatamento.
Fonte: IMAZON (2018).

2.2.1 Sistemas de Monitoramento

O monitoramento da cobertura florestal da Amazônia é realizado pelo INPE, por meio de satélites, e conta com mais de um sistema, que atuam de forma integrada, para atender diferentes objetivos. O fato do ano de 2004 registrar a segunda maior alta na taxa anual de desmatamento da Amazônia Legal motivou o governo federal a reorganizar sua estratégia de controle do desmatamento na região Amazônica e, naquele ano, lançar o Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm), proveniente de Decreto Federal, de 03 de julho de 2003 (BRASIL, 2003), que instituiu o grupo responsável pelo plano, composto por 15 ministérios e outros órgãos vinculados à Presidência da República (Figura 2.5), intitulado Grupo Permanente de Trabalho Interministerial (GPTI), com a finalidade de propor e coordenar ações que visavam a redução dos índices de desmatamento na Amazônia.

O GPTI foi dividido em quatro subgrupos (Figura 2.5), que envolveram diversas estratégias e ações diferenciadas (MELLO; ARTAXO, 2017). É importante ressaltar que a dinâmica do desmatamento é diferente entre os estados da Amazônia, que possuem políticas fundiárias e históricos de ocupação distintos (COSTA, 2017). E, assim, como produto das políticas e ações implementadas pelo GPTI deu-se a reconhecida queda histórica no desmatamento de 2004 a 2012, quando a taxa anual teve uma redução de 27.772 km² para 4.571 km², equivalente a 83,5%.



Figura 2.5 - Organização do Grupo Permanente de Trabalho Interministerial.

Em 2004, como parte do PPCDAm, o INPE implementou o Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real (DETER), que foi desenvolvido como um sistema de alerta para dar suporte à fiscalização e o controle de desmatamento e da degradação florestal. Até o ano de 2017, o DETER operou com base nos dados do sensor MODIS a bordo do satélite Terra, que apresenta resolução espacial de 250 m, sendo possível detectar apenas alterações na cobertura florestal com área maior que 25 hectares (INPE, 2021a). Na ocasião, o Governo Federal combateu o desmatamento, uma vez que, forneceu alertas quase em tempo real, aumentando a eficácia das operações de fiscalização do IBAMA. Atualmente, o INPE opera uma versão do DETER onde são utilizadas imagens dos sensores WFI, do Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS-4), e AWiFS, do satélite *Indian Remote Sensing Satellite* (IRS), com 64 e 56 metros de resolução espacial, respectivamente. Os dados são enviados diariamente ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) sem restrição de área mínima mapeada. Entretanto, para o público em geral os polígonos são disponibilizados com dimensão mínima de 6,25 ha, permitindo dessa maneira o estabelecimento de um critério de comparação com os dados gerados pelo projeto PRODES (INPE, 2021a).

Assim, o DETER passou a operar em conjunto com o PRODES, que o fornece o mapa base inicial, isto é, a referência das áreas desmatadas em períodos anteriores, a partir dos dados históricos do PRODES Digital. Entretanto, como o principal objetivo do DETER é fornecer dados para a fiscalização, este sistema opera com um conceito de desmatamento mais abrangente do que o do PRODES, não mais se limitando a corte raso, mas incluindo agora o processo de degradação florestal progressiva (INPE, 2021c). A caracterização do desmatamento em apenas floresta e área desmatada por corte raso não retrata a dinâmica nem a complexidade da paisagem na Amazônia

Brasileira. O DETER é considerado um instrumento dinâmico para a fiscalização, sendo capaz de identificar o desmatamento e a degradação florestal. O DETER identifica estágios de degradação da floresta até o desmatamento, possibilitando o seu combate durante o processo de degradação, para isso é fundamental que as ações sejam imediatas. No processo de modelagem desse estudo utilizamos dados consolidados anualmente desde 1988, ou seja, os dados de desmatamento registrados desde o início do monitoramento do PRODES.

A criação de áreas de proteção e posteriormente reforço na fiscalização e combate a desmates ilegais foram ações articuladas pelo PPCDAm, sendo atribuído a essas políticas e ações realizadas nesse período a criação de 25 milhões de hectares em unidades de conservação e um novo órgão para manejo, o Instituto Chico Mendes (ICMbio).

Outra ferramenta de monitoramento da Amazônia baseada em imagens de satélites é o Sistema de Alerta de Desmatamento (SAD), que foi desenvolvido pelo Imazon em 2008, com a proposta de reportar mensalmente o ritmo do desmatamento e da degradação florestal na Amazônia. O SAD detecta áreas de desmatamento fazendo uso de imagens dos satélites *Landsat 7* (sensor ETM+), *Landsat 8* (OLI), *Sentinel 1A* e *1B* e *Sentinel 2A* e *2b* (MSI) e com a combinação das imagens, é possível voltar a alcançar a mesma área a cada 5 a 8 dias (IMAZON, 2019). O SAD prioriza o processamento de imagens adquiridas na última semana do mês para detectar e mapear os alertas mensais de desmatamento. Esses satélites permitem detectar desmatamentos com detalhe de 20 a 30 metros. Com o *Sentinel 1*, é possível monitorar através de nuvens, usando imagens de radar, permitindo assim o aumento da capacidade de monitoramento no período de chuvas (IMAZON, 2019). O SAD e o DETER geram alertas mensais de desmatamento e de degradação florestal, utilizando metodologias diferentes.

Em agosto de 2021, o Imazon, em parceria com a Microsoft e o Fundo Vale, desenvolveu uma plataforma inovadora, denominada Previsia, que utiliza inteligência artificial para indicar áreas sob risco de desmatamento na Amazônia. O Previsia (2021) analisa um conjunto de variáveis para indicar as áreas sob maior risco de desmatamento no bioma, a partir de dados relacionados à topografia, à cobertura do solo, às estradas legais e ilegais, à infraestrutura urbana e à socioeconomia. As previsões de desmatamento são para períodos de até um ano.

De acordo com Aroeira (2020) os instrumentos de monitoramento estão sendo subutilizados e a fiscalização foi enfraquecida quando a coordenação foi removida da Casa Civil para o Ministério do Meio Ambiente. Especialistas alertam que um dos principais trunfos para um combate efetivo ao desmatamento na Amazônia é a

coordenação conjunta entre ministérios e órgãos, num modelo semelhante ao implantado em 2004 e que existem avanços na responsabilização, mas a impunidade é predominante (AZEVEDO *et al.*, 2020).

Atualmente, as atividades pecuárias, a produção de soja, os investimentos em infraestrutura e a grilagem de terras ainda constituem os principais vetores diretos de desmatamento na Amazônia Legal (MELLO; ARTAXO, 2017).

2.2.2 Principais Fatores do Desmatamento

O desmatamento pode ser causado por fatores naturais, embora na Amazônia a atividade humana é a grande responsável pela destruição da floresta. Suas causas podem ser muitas, mas geralmente incluem a necessidade de se explorar as florestas para obter ganhos econômicos, como obtenção de madeira, atividade agropecuária, mineração, implantação de infraestrutura, expansão urbana; sendo a combinação desses e outros fatores que normalmente promovem o desmatamento na Amazônia.

2.2.2.1 Extração Madeireira

De acordo com Homma (2011) a extração madeireira na Amazônia foi impulsionada pela elevada demanda por produtos madeireiros associado ao esgotamento das reservas da Mata Atlântica, à abertura de rodovias na região e à expansão da fronteira agrícola. O acesso rodoviário facilita a entrada na mata e a extração seletiva de madeira. As áreas que foram objeto de extração seletiva têm maior chance de serem ocupadas por novos moradores e de sofrerem corte raso e, posteriormente, essas áreas degradadas são destinadas à agricultura e à pecuária (PEREIRA, 2020).

Embora a legislação brasileira autorize a exploração madeireira em áreas específicas, a extração ilegal de madeira é mais comum em virtude de sua alta rentabilidade e dificuldade de controle e monitoramento da atividade pelo estado. Cardoso (2020) realizou estudo, no estado do Pará, referente ao período de agosto de 2017 a julho de 2018, e demonstrou que um total de 38.573 hectares de florestas foram explorados pela atividade madeireira e a maioria (70% ou 26.938 hectares) não possuía autorização do órgão competente, enquanto somente cerca de 30% (11.634 hectares) foi executada com a devida autorização. O Relatório Anual do Desmatamento no Brasil (AZEVEDO *et al.*, 2020) revela que quase todo desmatamento tem fortes indícios de ilegalidade. A extração ilegal de madeira se caracteriza das seguintes formas: pelo uso de licenças falsas, o corte de árvores comercialmente valiosas, independentemente de

serem protegidas por lei, o corte em quantidades superiores às cotas permitidas por lei também é outra prática comum, assim como o corte fora de áreas de concessão florestal, tais como dentro unidades de conservação e terras indígenas (PEREIRA, 2020).

2.2.2.2 Agricultura e Pecuária

O desmatamento na Amazônia brasileira tem como principais causas diretas a pecuária, a agricultura de larga escala e a agricultura de corte e queima. Desses fatores, a expansão da pecuária bovina é principal atividade responsável pelo desmatamento (RIVERO *et al.*, 2009). A remoção temporária ou parcial da floresta para a sua conversão em áreas de pastos e agrícolas normalmente são associadas com a extração seletiva de madeira (ÂNGELO; DE SÁ, 2007) e o uso de fogo, que é empregado em atividades agrícolas para limpar o terreno e, no caso da pecuária, para abrir espaço para o gado. Pelos dados do TerraClass, que é um programa de monitoramento das áreas desmatadas, realizado pelo INPE e pela Embrapa, nessas áreas se colocam espécies de gramíneas, forrageiras e capim para introduzir o gado. O TerraClass é responsável por qualificar o desflorestamento na Amazônia Legal Brasileira e com isso fornece subsídios importantes para o melhor entendimento das formas de uso e cobertura da terra na Amazônia (INPE, 2019a).

Rivero *et al.* (2009) ressalta que políticas para a pecuária devem considerar que a expansão da pecuária é a principal causa imediata do processo de desmatamento e a atividade é, em sua maior parte, extensiva com baixa densidade do rebanho. Primeiro, os produtores queimam e removem a mata nativa, posteriormente, a área é coberta por vegetação para alimentação do gado. Por fim, muitos terrenos são abandonados, e dão lugar aos vazios sem árvores. Quanto ao uso da terra, a pesquisadora Vieira (2019) advertiu que a cada 10 hectares da Amazônia, seis viram pasto, três são abandonados e um vira agricultura.

O agronegócio paraense contribui em média 21% para a composição do PIB dos municípios, representando a base econômica de grande parte deles e fonte de ocupação para parcela substantiva da população, absorvendo também cerca de um milhão e meio de pessoas na força de trabalho (FAEPA, 2021) e, de acordo com a mesma fonte, a expansão agrícola no estado vem sendo efetuada em campos naturais e áreas já alteradas, ou seja, não está utilizando área de floresta nativa, evitando-se, assim, o desmatamento. A agricultura do Pará tem um papel importante na economia brasileira.

Na pecuária, o Pará ocupa o 4º lugar no ranking nacional, com um rebanho de aproximadamente 22 milhões de cabeças (IBGE, 2017), incluindo o rebanho bubalino (cerca de 513 mil cabeças), o maior do País, concentrado principalmente no arquipélago Marajoara (FAEPA, 2021). O Pará é um dos maiores produtores de gado do Brasil e a pecuária é o principal uso da terra associado ao desmatamento (VIEIRA, 2019).

2.2.2.3 Mineração

A extração mineral é classificada como mineração industrial e garimpo. A atividade garimpeira, que é a extração de minérios de forma predatória e ilegal, ocupa uma área maior que mineração industrial e avança sobre terras indígenas e unidades de conservação na Amazônia. Em 2020, os registros de áreas associadas a essas atividades foram de 107.800 ha para o garimpo e 98.300 para a mineração industrial (OVIEDO, 2021).

De acordo com o Mapbiomas (2021) entre 1985 e 2020 a área minerada no Brasil cresceu seis vezes e 72,5% está na Amazônia, sendo que quase totalidade (93,7%) do garimpo do Brasil concentra-se nela. A região do Tapajós, no Pará, é considerada o epicentro do garimpo ilegal na Amazônia e apenas em duas cidades, Itaituba e Jacareacanga, localizadas nessa região, foram registrados 70% de todo o desmatamento do garimpo na Amazônia brasileira. Os garimpeiros costumam usar mercúrio para separar as partículas de ouro, causando grande poluição nos rios.

Segundo Sonter *et al.* (2017) a mineração aumentou significativamente a perda da floresta amazônica em até 70 km além dos limites dos contratos de mineração, sendo responsável por 9% de todo o desmatamento da Amazônia no período de 2005 a 2015, o que equivale a uma área de 11.670 km². Para os pesquisadores, o estabelecimento da infraestrutura para a mineração, expansão urbana para apoiar a força de trabalho, o desenvolvimento de cadeias de abastecimento de commodities minerais e novas rotas de transporte, tais como estradas e ferrovias acabam por permitir outras formas de desmatamento, incluindo garimpo ilegal e agricultura.

2.3 Desmatamento no Estado do Pará

O Pará é o estado que perdeu mais cobertura florestal, correspondendo a 34,42% de todo o desmatamento medido pelo PRODES, sistema oficial de monitoramento operado pelo INPE (2021c). Considerando o período de 1988 a 2020, o ano de 2004 foi o de maior desmatamento no estado do Pará, com uma taxa anual de 8.870 km² seguido pelo ano de 1995, que apresentou uma taxa anual de 7.845 km² (Figura 2.6). Esses

valores são superiores as taxas de desmatamento anuais da Amazônia Legal no período de 2009 a 2018 (Figura 2.3). A Figura 2.7 mostra os locais onde mais ocorreu desmatamento no Pará, sendo intenso no Nordeste e Sudeste do estado e ao longo das rodovias BR-163 e BR-230. A imagem, oriunda de captura de satélite, também registra acentuado desmatamento próximo às margens do rio Amazonas.

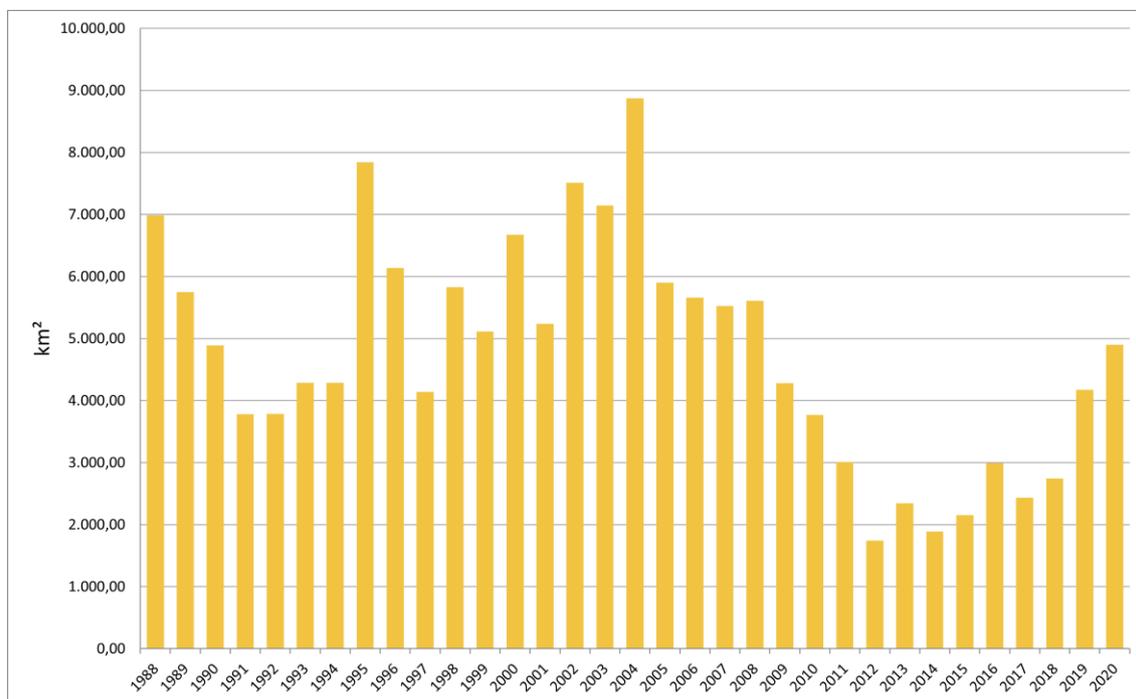


Figura 2.6 – Desmatamento anual no estado do Pará no período de 1988 a 2020.

Fonte: INPE (2021a).

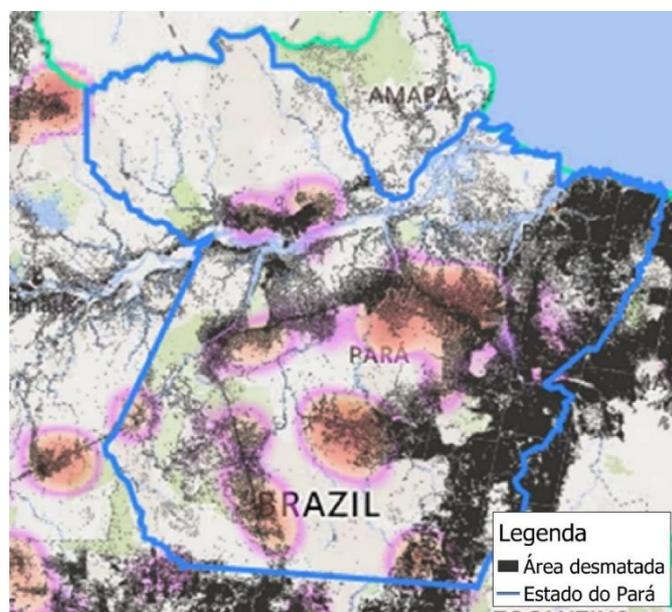


Figura 2.7 – Área desmatada do estado do Pará.

Fonte: Previsia (2021).

O Governo Federal anunciou suas metas de redução de emissões por desmatamento (parar o desmatamento ilegal até 2030) no âmbito do Acordo de Paris assinado pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. O Brasil também anunciou, em 2009, que reduziria o desmatamento na Amazônia em 80% até 2020, prometendo que a taxa anual de 2020 seria de 3.925 km². Com o crescimento das taxas anuais, com valores superiores a 10.000 km²/ano, o esforço necessário para atingir essa meta será muito mais desafiador.

Moutinho e Guerra (2016) indicam elementos necessários para reverter essa nova tendência assustadora. Eles ressaltam que as ferramentas para a extinção do desmatamento na Amazônia já são conhecidas, e citam como exemplos: a implementação total do Código Florestal (legislação que protege as florestas), a alocação de florestas públicas como áreas protegidas e incentivos positivos para aqueles que conservam a floresta são apresentados como os caminhos mais cruciais para zerar o desmatamento na região.

A região da Calha Norte é a área mais preservada do estado do Pará, com desmatamento quase inexistente e sem infraestrutura rodoviária, com exceção próximo à margem esquerda do rio Amazonas (Figura 2.7), onde dispõe de rodovias estaduais. O risco de desmatamento nos municípios dessa região não é apontado pelo Previsia (2021) no ranking dos mais ameaçados do estado do Pará (Figura 2.8). A curto prazo o risco de desmatamento continua sendo na região mais desmatada.

RANKING DE RISCO DE DESMATAMENTO POR MUNICÍPIO			
Rank	Municípios	Área de Risco até 04/2022	Unidade de Conservação com Maior Risco
1º	São Félix do Xingu	415 km ²	Apa Triunfo do Xingu
2º	Altamira	374 km ²	Apa Triunfo do Xingu
3º	Itaituba	250 km ²	Área de Proteção Ambiental do Tapajós
4º	Pacajá	229 km ²	-
5º	Portel	202 km ²	Floresta Nacional de Caxiuanã
6º	Novo Progresso	164 km ²	Área de Proteção Ambiental do Tapajós
7º	Novo Repartimento	147 km ²	Apa do Lago de Tucuruí
8º	Senador José Porfírio	147 km ²	Rds Vitória de Souzel
9º	Uruará	136 km ²	-
10º	Anapu	131 km ²	-

Figura 2.8 – Previsão realizada em 07/10/21 sobre os municípios do estado do Pará com maior risco de desmatamento.

Fonte: Previsia (2021).

A Amazônia contém extensas áreas que já foram desmatadas e estão disponíveis para a agricultura e maior eficiência na criação de gado. Parte significativa do setor privado já reconhece a importância de manter suas cadeias produtivas livres do desmatamento. Portanto, o grande desafio é reverter essa tendência emergente de aumento das taxas de desmatamento. Faz parte do propósito dessa Tese estimar a área a ser desmatada na Calha Norte provocada pelos projetos de prolongamento da BR-163 e implantação da BR-210.

3 TRANSPORTE NA AMAZÔNIA

A Amazônia possui um enorme potencial para o uso do transporte hidroviário e foi por meio desta rede hidroviária que aconteceu o processo de colonização e exploração dela. A navegação sempre exerceu um papel importantíssimo nessa região e durante os primeiros séculos, após o descobrimento do Brasil, foi o único modo de transporte existente (MARIN, 2004). A introdução da navegação a vapor na Amazônia foi institucionalizada pela Lei Imperial (BRASIL, 1850) que autorizava a navegação a vapor no rio Amazonas e seus afluentes, o que provocou um grande avanço no comércio, especialmente da borracha (LIMA NETO *et al.*, 2001).

Com o vapor, a duração das viagens experimentou considerável redução. Enquanto o Vingador tomava 12 dias de Belém a Manaus, sobre um percurso de 862 milhas, os vapores da Companhia de Navegação venciam esse trajeto em quatro dias. De Belém a Breves o trajeto era realizado a vela em cinco dias o que caía para 14 horas utilizando barco a vapor. O frete era necessariamente inferior: 290 reis no lugar de 400 por arroba de cação saindo de Santarém para Belém, e de 242 reis para 320 arrobas conduzidas de Breves para Belém. [...] A navegação fluvial completava a função dos vapores de cabotagem e longo curso sob controle de grandes companhias inglesas, alemãs, italianas que faziam a ligação de longo curso de Manaus e Belém com Nova York, Liverpool, Havre, Hamburgo e Genova. (MARIN, 2004).

Conforme apresentado por MARIN (2004), a introdução da navegação a vapor na Amazônia foi um marco e conseguiu melhorar substancialmente a eficiência dos deslocamentos hidroviários na região. Atualmente, as inovações do setor de transporte não têm sido incorporadas ao sistema de transporte da Amazônia com a mesma eficiência, e uma crítica comum ao transporte hidroviário na Amazônia é a falta de investimentos e políticas públicas para o setor (CNT, 2019). Naquele período, as inovações do setor, normalmente originárias da Europa, eram mais rapidamente incorporadas ao sistema de transporte brasileiro ao que ocorre atualmente.

O transporte hidroviário ainda é responsável por grande parcela do transporte de cargas e passageiros, oferecendo serviços de curta, média e longas distâncias. Na região amazônica é comum encontrar comunidades sem acesso terrestre, e o transporte fluvial ser o único meio de acesso utilizado. O Ministério da Marinha estima que 100 mil embarcações operem no transporte de passageiros na região, e quase totalidade das embarcações que operam no transporte de passageiros é de embarcações mistas, isto é, transportam passageiros e cargas (NEVES, 2007). Para Calheiros (2010), o uso da vasta malha hidroviária existente na região amazônica, faz com que os rios sejam considerados elementos básicos na estruturação de uma rede de transportes da região,

sejam de cargas ou de passageiros. Quando potencialmente navegáveis, os rios requerem baixos investimentos para melhorar suas condições naturais e transformá-los em hidrovias; e pelas grandes extensões que compõem a rede hidroviária, tornando-a altamente econômica, seus gastos com manutenção são reduzidos ou inexistentes, ao contrário do que acontece nas ferrovias e nas rodovias (CALHEIROS, 2010).

A importância dessa modalidade de transporte de passageiros dá-se em função do posicionamento dos núcleos populacionais situados à margem dos rios sem outras alternativas de deslocamento. Dessa forma, o transporte hidroviário exerce um papel fundamental idêntico ao sistema rodoviário de outras cidades, devido à capilaridade dos rios da bacia amazônica (MORGADO; PORTUGAL; MELLO, 2013). Portanto, por se tratar de uma população de baixa renda e com importantes problemas sociais, normalmente essas viagens são realizadas em condições precárias de segurança e conforto (CALHEIROS, 2010).

Embora o transporte hidroviário de passageiros apresente, potencialmente, uma série de vantagens competitivas, ele é ineficiente na Amazônia, com embarcações obsoletas e terminais inadequados, desprovidos de integração com os outros sistemas de transporte. O transporte hidroviário exerceu e ainda tem um papel fundamental na Amazônia, favorecido pela vocação hidroviária local. No decorrer do tempo, surgiram as primeiras rodovias e o sistema rodoviário iniciou seu processo de expansão. A prioridade concedida ao modo rodoviário no país, além do ambiente político favorável, foi ao longo do tempo amparada pelo processo tradicional de planejamento de transportes, focado na ampliação da oferta, através da expansão da rede rodoviária (NEVES, 2007).

Segundo Fogliatti *et al.* (2004), durante as décadas de 1950 e 1960, o termo desenvolvimento era associado apenas ao crescimento econômico e à industrialização, sem preocupação com a proteção ao meio ambiente, sendo assim, o transporte rodoviário, com suas vantagens competitivas no que se refere à flexibilidade, ao conforto e a imagem de status que foi construída em torno do automóvel, atendeu de forma mais satisfatória a essa lógica desenvolvimentista e contribuiu de forma decisiva para o modelo rodoviário implantado no país (LIMA NETO *et al.*, 2001). Somente no final da década de 1960, em decorrência de acidentes ambientais ocorridos, é que surge a proposta de se impor limites ao modelo de crescimento vigente. Na década de 1980, a preocupação ambiental assumiu uma conotação mais abrangente, voltada não somente para o esgotamento das fontes de recursos naturais, mas também para a capacidade de absorção nos ecossistemas da poluição gerada pela humanidade. Assim, em 1987, a partir do Relatório Brundtland (ONU, 1987) surge o conceito de desenvolvimento sustentável.

As propostas para o setor de transportes têm se manifestado de várias formas, algumas vezes atendendo aos princípios de sustentabilidade, muito embora, no que se refere à participação de modos sustentáveis na matriz modal, constatamos relaxamento na implementação de modalidades mais sustentáveis, contrariando e descumprindo os acordos e metas ambientais nacionais e internacionais. Por exemplo, algumas rodovias amazônicas, como BR-163, BR-230 e BR-319, atravessam reservas indígenas e ambientais, áreas de garimpo e regiões de fortes conflitos fundiários (IPEA, 1998). No que se refere ao transporte terrestre, a rede rodoviária da Amazônia é formada por rodovias federais, estaduais, rede viária municipal e uma vasta malha de vias desregulamentadas, denominada nesse estudo como rede clandestina.

Com relação ao sistema ferroviário destacam-se a Ferrovia Norte-Sul e a Estrada de Ferro Carajás. A Estrada de Ferro de Bragança foi a primeira ferrovia da Amazônia, localizada no estado do Pará, ligava Belém ao município de Bragança e foi destinada à colonização da região leste do Pará e ao abastecimento de Belém e da região (LIMA NETO *et al.*, 2001). Do início da República (1889) até o primeiro período Vargas (1930-1945), foram implantadas as ferrovias destinadas a ligar trechos de rios cuja navegação era interrompida por cachoeiras, como a Estrada de Ferro Madeira Mamoré (EFMM), com a finalidade de exportação da borracha e a Estrada de Ferro Tocantins. Posteriormente, tendo como objetivo imediato a exportação de minérios, celulose e grãos foram implementadas as seguintes: Estrada de Ferro Amapá, Estrada de Ferro Jari, Estrada de Ferro Trombetas, Estrada de Ferro Carajás, Ferrovia Norte-Sul e Estrada de Ferro Juruti (CAVALCANTI, 2020).

3.1 Infraestrutura Rodoviária

O processo de expansão do sistema de infraestrutura rodoviária teve como marco o Decreto nº. 8.324/1910 (BRASIL, 1910), do Governo Federal, no qual se incentivava a construção de rodovias “prévias subvenções a serem pagas pelo governo por quilômetro de rodovia construída dentro das especificações de projeto e execução dele constantes que pretendiam introduzir no País padrões mínimos de tecnologia rodoviária” (LIMA NETO *et al.*, 2001). Assim, até 1925, as regiões Sul, Sudeste e Nordeste foram contempladas com a construção de diversas obras rodoviárias. Embora a região Norte não tenha sido beneficiada com o Decreto, os planos viários elaborados para o país, na década de 20, previam ligações rodoviárias de importantes cidades da região Norte para outros centros econômicos do País. O Plano Catrambry, de 1926, propunha ligações do Sudeste com a região Norte, de São Paulo (SP) até Belém (PA) e outra ligação até

Cruzeiro do Sul (AC), além de uma rede ligando importantes polos regionais (Figura 3.1 a).

No ano seguinte, Luiz Schnoor, Ministro da Viação e Obras Públicas, considerando que a futura capital do país seria no planalto central, em Goiás, reformulou o Plano Catramby, propondo um sistema de rodovias irradiando deste ponto central para as demais regiões do país (Figura 3.1 b), registrando na rede proposta a influência das discussões da transferência da Capital Federal, a fim de propiciar o processo de integração das regiões a partir do centro geográfico do país (MINFRA, 2016; POLICARPO, 2019). Assim, em 1927, foi divulgado o Plano Schnoor e, no ano seguinte, a Comissão de Estradas de Rodagem Federais apresentou um plano detalhado para uma rede rodoviária articulada, onde apenas o Amazonas permaneceu dependente das suas ligações hidroviárias e várias estradas de ferro, antes planejadas, foram substituídas por ligações de rodagem (LIMA NETO *et al.*, 2001).

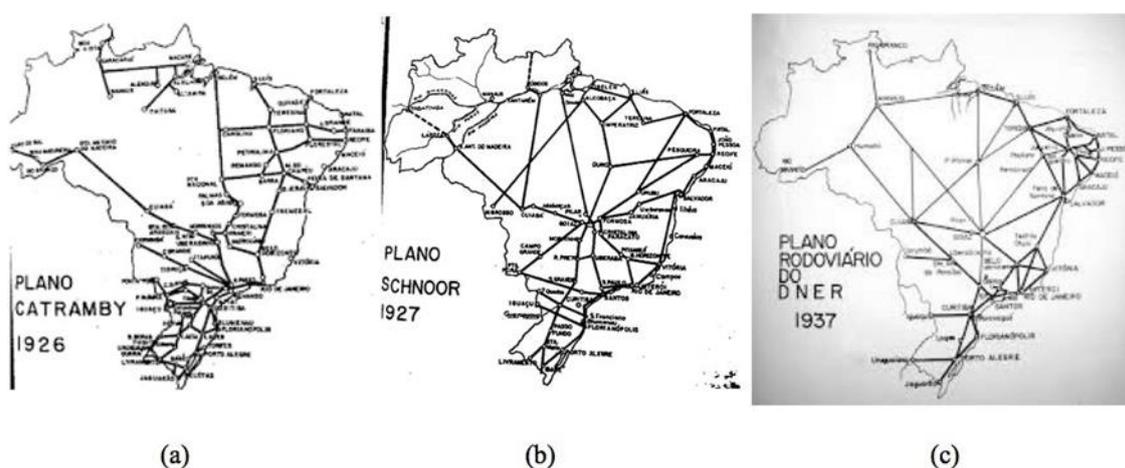


Figura 3.1 - Mapas dos Planos de Transporte (a) Plano Catramby, de 1926; (b) Plano Schnoor, de 1927 e (c) Plano Rodoviário do DNER, de 1937.

Fonte: FAU/USP (2020); Policarpo e Souza (2019).

A partir dos planos de transportes elaborados nesse período, é visível a preocupação em integrar a região amazônica com o restante do país por meio de sistema de transporte terrestre. Vale ressaltar que, nessa época, a Amazônia tinha um papel de destaque na economia nacional e maior autonomia no que se refere a ligações de transporte aquaviário direto com a Europa, linhas regulares, independentemente do restante do país (MARIN, 2004).

O Plano Geral de Viação Nacional de 1934 (Figura 3.2), criado no Governo Getúlio Vargas, foi o primeiro projeto nacional para os transportes aprovado oficialmente e a

entrar em vigor legalmente, por meio do Decreto nº. 24.497, de 29 de junho de 1934. Teve grande influência dos planos anteriormente elaborados, apresentou a rede de transporte de natureza multimodal, mas a prioridade conferida pelo governo à modalidade rodoviária já começava a se revelar.

Ainda em 1933, um grupo de trabalho passa a elaborar o Projeto de Lei que criaria o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER. A sua fundação e do Fundo Rodoviário Nacional ocorreu em 1937, o DNER respondia pelo plano geral das estradas, fiscalizando os serviços técnicos e administrativos, regulando e policiando o tráfego e nesse mesmo ano o novo órgão apresentou um plano de viação, acentuando a política rodoviária em detrimento à ferroviária, sem grande repercussão. No Plano do DNER foram estabelecidos os conceitos básicos de categorias de estradas e se definiram as atribuições de cada um dos escalões governamentais intervenientes na construção e conservação de rodovias. O Plano estabelecia um maior número de nós viários e um traçado mais voltado para o interior diante da estratégia estabelecida para transferência da capital brasileira, cuja influência direta deriva do Plano Schnoor-1927 (LIMA NETO *et al.*, 2001; POLICARPO, 2019).

Os planos viários propostos nesse período, como o Plano Geral de Viação Nacional, de 1934; o Plano Rodoviário do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, de 1937; o Plano Rodoviário Nacional, de 1944 e o Plano Nacional de Viação, de 1951; deram base para a elaboração dos planos viários efetivados sobre o território brasileiro a partir do final da década de 1950 (POLICARPO, 2019).

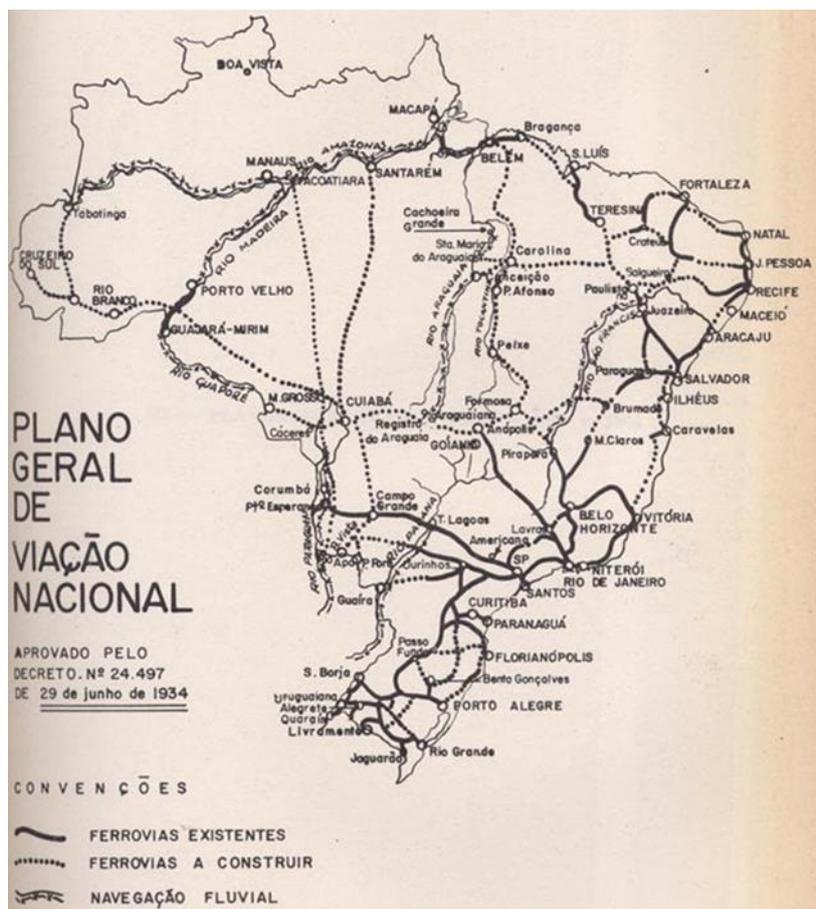


Figura 3.2 - Plano Geral de Viação Nacional de 1934.

Fonte: FAU/USP (2020).

Os investimentos no setor rodoviário foram intensificados por meio do Programa de Metas, na gestão do presidente Juscelino Kubitschek, partindo do princípio que o modal rodoviário seria o mais eficiente para assegurar, em tempo hábil, as ligações de Brasília com as regiões do País. Assim, a partir dessa época iniciou-se um processo intenso de expansão do sistema rodoviário no Brasil e vigente na Amazônia a partir da década de 1970.

3.2 As Estradas e o Desmatamento na Amazônia

As questões mais urgentes em termos da conservação e uso dos recursos naturais da Amazônia dizem respeito à perda em grande escala de funções críticas da Amazônia frente ao avanço do desmatamento ligado às políticas de desenvolvimento na região, tais como especulação de terra ao longo das estradas, crescimento das cidades, aumento da pecuária bovina, exploração madeireira e agriculturas familiar e

mecanizada, principalmente ligada ao cultivo da soja e algodão (LAURANCE *et al.*, 2001; VILELA *et al.*, 2020). Esse aumento de atividades econômicas em larga escala sobre os recursos da Amazônia Legal brasileira tem aumentado drasticamente a taxa de desmatamento.

Nepstad *et al.* (2001) demonstraram a relação existente entre os desmatamentos e rodovias pavimentadas na Amazônia. No estudo, considerando uma faixa de 50 km de largura ao longo das estradas, o desmatamento por meio da conversão da floresta em plantações, pastagens e floresta secundária desmatou de 29 a 58% ao longo de rodovias pavimentadas e de 0 a 9% ao longo de estradas não pavimentadas, e três quartos dos desmatamentos, entre 1978 e 1994, ocorreram dentro de uma faixa de 100 km de largura ao longo das rodovias BR-010 (Belém- Brasília), BR-364 (Cuiabá- Porto Velho) e a rodovia estadual PA-150.

A concepção de desenvolvimento da Amazônia focado na expansão da rede rodoviária é mantida no atual governo brasileiro. Em 2019, o Governo Federal apresentou o Projeto Barão do Rio Branco que consiste em três grandes obras na região Noroeste do estado do Pará, conhecida como Calha Norte. São elas: construção de uma ponte sobre o rio Amazonas, prolongamento da rodovia BR-163, cortando uma grande extensão de floresta em áreas protegidas e a construção de uma hidrelétrica na região de Trombetas (BRASIL, 2019d). Todas as entidades que representam os povos indígenas dessa região manifestaram-se radicalmente contra o projeto, alegando que causará impactos destrutivos e irreversíveis para eles, afetando o seu modo de vida, que é baseado no uso sustentável dos recursos naturais (APIB; COIAB; APOIANP; FEPIPA, 2019). O projeto também tem resistência de outros grupos e organizações não governamentais defensores do meio ambiente, pelo fato de ser na região da Calha Norte, cuja conservação, manutenção, e proteção é imprescindível para a sobrevivência da sociobiodiversidade que singulariza uma região que é constituída por diferentes Áreas Protegidas (APs), entre Terras Indígenas (TIs), Territórios Quilombolas (TQs) e Unidades de Conservação (UCs) de proteção integral e uso sustentável.

Outro projeto rodoviário do Governo Federal, divulgado em novembro de 2020, é o prolongamento da rodovia BR-364. Esse projeto consiste em uma nova rota para escoamento rodoviário de produção por meio do Oceano Pacífico, mas o traçado da rodovia passa pelo Parque Nacional da Serra do Divisor, o de maior biodiversidade de toda a região, uma área de proteção integral que fica no estado do Acre, na fronteira com o Peru. Atualmente o Governo trabalha na elaboração do termo de referência para a contratação do projeto (PODER 360, 2020). A recuperação da rodovia BR-319 (Manaus - Porto Velho) é considerada uma das mais graves ameaças para a preservação da Amazônia e é uma das prioridades de investimento em infraestrutura do

Governo Federal na região Norte (FERRANTE *et al.*, 2021). A rodovia BR-319 é também apontada como um risco à sobrevivência de dezenas de comunidades indígenas, pela consequente abertura descontrolada de estradas clandestinas no seu entorno. A repavimentação deve acelerar o avanço do “arco do desmatamento” para a parte central e norte da Amazônia Legal.

A ausência de governança, a retração das proteções ambientais, a violação atual da legislação ambiental e dos direitos indígenas, e os diversos projetos de infraestrutura rodoviária retomados são aspectos que combinados vão acelerar a devastação (FERRANTE *et al.*, 2021; FERRANTE; GOMES; FEARNSSIDE, 2020). O planejamento da infraestrutura de transportes na Amazônia deve preferir soluções sustentáveis e o modal hidroviário que deveria ser priorizado e adotado como indutor de atividades econômicas e melhoria social, pelo potencial hidroviário existente e vantagens ambientais (FOGLIATTI; FILIPPO; GOUDARD, 2004; MORGADO; PORTUGAL; MELLO, 2013). A alternativa modal a ser expandida na Amazônia é o transporte ferroviário, os sistemas sobre trilhos apresentam benefícios quando comparados com o sistema rodoviário, bem como os custos de manutenção serem inferiores e a ferrovia apresentar vantagens ambientais importantes, pois permite maior controle de acesso aos terrenos adjacentes, restringindo a expansão de rede rodoviária desregulamentada (BACHI JUNIOR; TIAGO FILHO; SEYDELL, 2016; SANTOS *et al.*, 2020).

3.2.1 Rede Viária Clandestina

As vias clandestinas definidas neste estudo consideram o conjunto da rede viária formada pelas estradas vicinais, que normalmente são caracterizadas como estradas de assentamento rural, e pelas estradas ilegais, aquelas construídas pelo poder privado, à revelia do Estado, para atender principalmente à demanda de madeireiros, pecuaristas e grileiros. As referidas estradas foram agregadas numa única variável denominada rede viária clandestina. Portanto, o termo clandestina utilizado nesta Tese não deve ser associado à ilegalidade das vias, vale destacar que a maior parcela é de vias ilegais, mas não são todas as vias do conjunto de estradas atribuído à rede viária clandestina que são ilegais.

As estradas vicinais são normalmente abertas pelo poder público municipal, é uma estrada local, destinada principalmente a dar acesso a propriedades lindeiras ou caminho que liga povoações relativamente pequenas e próximas, de leito em terreno natural, sem atendimento às normas técnicas, podendo eventualmente receber revestimento primário -ou seja, não atendem às normas rodoviárias de projeto geométrico- não se enquadrando, portanto, em nenhuma das classes de rodovias

estabelecidas pelo DNIT (2007). As vicinais caracterizadas como estradas de assentamento, normalmente são construídas pelas prefeituras e/ou governo estadual, em parceria com o INCRA (2020), também são implantadas sem os critérios técnicos normativos, não obedece à nomenclatura oficial e normalmente são denominadas com nome de logradouros, mas foram designadas neste trabalho como clandestinas pela função que exercem, ou seja, comumente elas são utilizadas para o tráfego de produtos e atividades ilegais, são vias desprovidas de fiscalização e padrão rodoviário, construídas sem as formalidades legais, e em termos quantitativos representam de um terço a um quarto do total da extensão das estradas ilegais.

As vias ilegais são implantadas por agentes privados, em geral, sem planejamento ou critérios técnicos e sem as autorizações exigidas por lei, são vias executadas para facilitar a grilagem, o desmatamento, a exploração predatória de madeira e a ampliação dos conflitos pela posse da terra, são de leito em terreno natural e estão definidas em uma nova dinâmica de ocupação na Amazônia (SOUZA JR *et al.*, 2020). No estado do Pará, os atores locais, principalmente os madeireiros, têm construído milhares de quilômetros dessas estradas em terras públicas, que avançam desordenadamente e geram graves impactos ambientais e socioeconômicos (SOUZA JR. *et al.*, 2013). Ribeiro (2018) ressalta que é preciso otimizar o monitoramento durante o processo de construção das estradas clandestinas, utilizando tecnologia que gere informações em tempo quase real para frear o avanço, associado aos mecanismos de fiscalização para apreender equipamentos utilizados na construção e obstruir as estradas existentes.

Nomenclaturas encontradas na literatura utilizadas para as estradas com essa função e características foram: estradas endógenas (SOUZA JR. *et al.*, 2013), estradas madeireiras (ORRICO FILHO, 2005), estradas secundárias espontâneas (PREVISIA, 2021) e estradas não oficiais (RIBEIRO; SOUZA JR., 2018). No estado do Pará, eventualmente acontece a “municipalização” dessas estradas, ou seja, são incorporadas ao sistema viário municipal (SOUZA JR. *et al.*, 2013).

Mediante esse cenário, é muito preocupante o planejamento de transportes vigente para a Amazônia, com propostas de expansão e investimentos no sistema rodoviário e sem políticas efetivas de combate ao desmatamento. Se a relação histórica entre implantação de rodovias e alteração florestal continuar, o desmatamento tende a aumentar nos próximos anos. Vale dizer que, em 2020, foi registrado o maior desmatamento da Floresta Amazônica dos últimos dez anos (IMAZON, 2021b).

3.3 Rodovias Previstas para a Calha Norte

O sistema rodoviário oficial e regulamentar do estado do Pará é formado pela rede federal, rede viária estadual e conjunto de vias municipais. A Figura 3.3 mostra a rede viária federal e estadual do Pará, incluindo as rodovias planejadas.

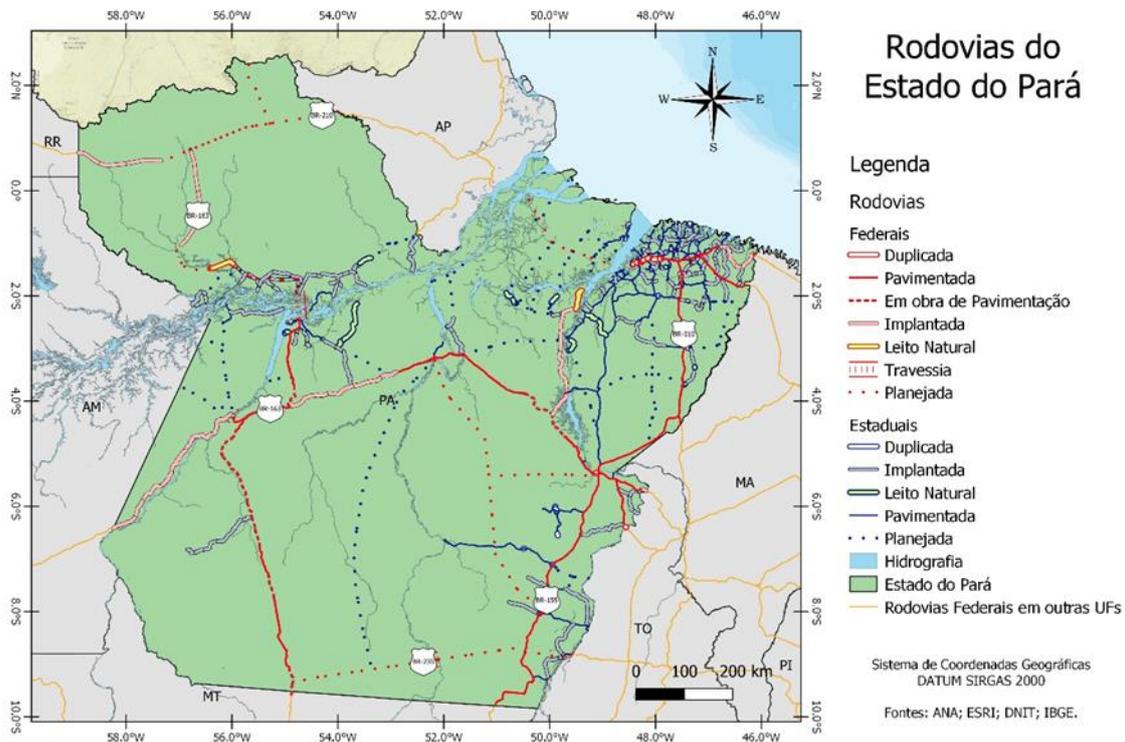


Figura 3.3 - Mapa rodoviário do estado do Pará.

Fonte: SIRGAS (2020).

A Calha Norte do Pará está situada ao norte do rio Amazonas e faz fronteira com Guiana e Suriname, esta região abrange uma área de 270.080 km², cerca de 22% da área territorial do Pará e equivalente à soma da área dos estados de São Paulo e Alagoas. Do total do território, 82% é formado por unidades de conservação, terras indígenas e quilombolas, que criam um escudo protetor contra a devastação. O desmatamento atingiu apenas 5% do seu território em 2011, embora em 2017, 9,6% do território havia sido atingido, sendo que 97% desse desmatamento ocorreram fora das áreas protegidas, uma demonstração da sua eficácia na proteção da floresta (IMAZON, 2012; WENZEL; SÁ, 2019).

A Calha Norte do Pará é formada por nove municípios da mesorregião do baixo Amazonas, são eles: Alenquer, Almeirim, Curuá, Faro, Monte Alegre, Óbidos, Oriximiná, Prainha e Terra Santa (Figura 3.4) e localizam-se na margem esquerda do rio Amazonas. A população estimada é de 347.732 habitantes (IBGE, 2021), o que representa uma densidade populacional de apenas 1,28 habitante por quilômetro quadrado.

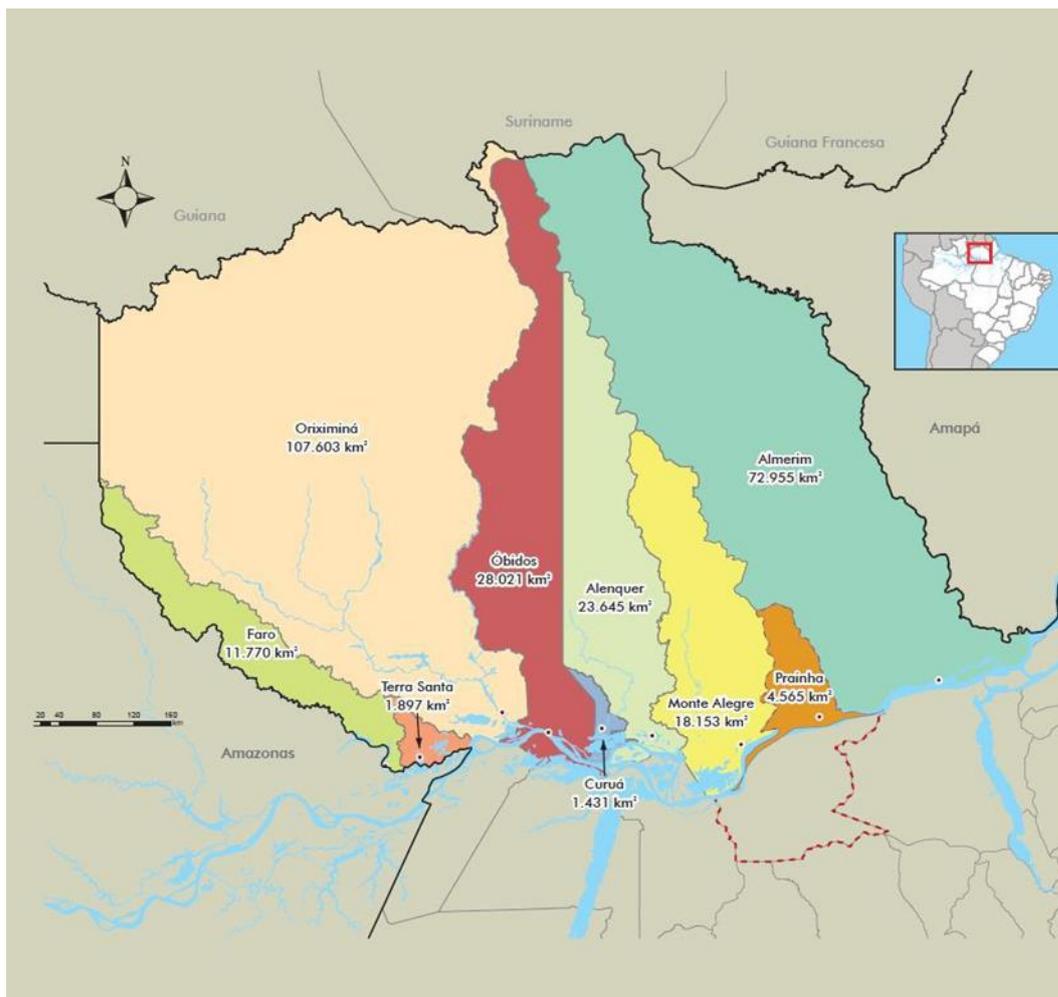


Figura 3.4 – Municípios da Calha Norte do estado do Pará.

Fonte: Imazon (2012).

3.3.1 Rodovia Federal BR-163

A BR-163 é uma rodovia federal longitudinal que integra o Sul ao Centro e Norte do Brasil. Possui 3.579 km em sua extensão total e seu trecho principal liga as cidades de Tenente Portela, no Rio Grande do Sul, a Santarém, no Pará, existindo ainda um trecho complementar localizado entre as cidades de Oriximiná e Óbidos, ambos municípios localizados na Calha Norte. Esta rodovia também é conhecida como rodovia Cuiabá-Santarém no trecho que liga as referidas cidades com extensão de 1.780 km (MMA, 2004; TALASKA; ARANTES; FARIAS, 2010). A BR-163 é parte do Projeto de Integração Nacional (PIN), criado durante o governo presidencial do general Emílio Garrastazu Médici (1969-1974), pelo Decreto-Lei nº: 1106, de 16 de junho de 1970, cuja finalidade principal era promover e financiar um conjunto de obras de infraestrutura na região Norte, com o intuito de viabilizar sua integração territorial e impulsionar a

economia nacional (OLIVEIRA NETO, 2015). Tinha como objetivo a ocupação de terras na região amazônica por meio da imigração de contingentes populacionais da região Nordeste (SOARES, 2015). A inauguração da BR-163 ocorreu em 1976, após seis anos do início da obra, quando os homens do 9º Batalhão de Engenharia e Construção encontram a equipe do 8º Batalhão de Engenharia e Construção na região sul do Pará, na Serra do Cachimbo, após cinco anos de trabalho (BRASIL, 2020). A BR-163 foi construída num contexto de fortes interesses geopolíticos do Governo Federal, relacionados à integração nacional e à expansão das atividades econômicas onde se buscava a integração e proteção da Amazônia.

Localizada entre os rios Tapajós e Iriri-Xingú, a implantação desta rodovia resultou em fortes impactos sociais e ambientais, tais como a instalação de frentes de colonização e de ocupação econômica, migrações desordenadas, desmatamento com exploração predatória dos recursos naturais, graves conflitos sociais com significativas perdas de vidas humanas, tais como do povo indígena Panará, que durante a abertura da BR-163 e por meio da violência do contato, ocorreu morte de dois terços de sua população, em razão de doenças e massacres (ISA, 2004; MMA, 2004).

A Rodovia Cuiabá-Santarém atravessa uma das áreas mais importantes da Amazônia em potencial econômico, diversidade social, biológica e riquezas naturais. Nela estão representados os biomas do Cerrado e da Floresta Amazônica e as bacias hidrográficas de Teles Pires/Tapajós, Xingu e Amazonas (BRASIL, 2004a). No Plano Plurianual 2004-2007, o Governo Federal incluiu a pavimentação da BR-163 (no trecho Cuiabá-Santarém), sendo essa obra antiga reivindicação dos produtores rurais do Médio Norte mato-grossense e vista como estratégica para o país, pois possibilita a ligação daquela região com os portos do Norte do país, permitindo assim um melhor uso do enorme potencial de navegabilidade dos rios amazônicos no escoamento da produção agrícola (MMA, 2004; PASTRE, 2018).

Fearnside (2005) relatou que o simples anúncio da pavimentação, e com o projeto ainda sem as devidas licenças ambientais, provocou a aceleração do desmatamento e a exploração ilegal de madeira em antecipação ao asfaltamento da rodovia. O autor advertiu inegável aumento de perda de floresta na área, assim como a migração de grileiros para novas fronteiras, e ressaltou que a pavimentação da rodovia não deveria ser concedida antes do estabelecimento de ordem na região, sugerindo a instauração de um nível de governança para garantir a segurança das áreas sob proteção e o cumprimento da legislação ambiental (FEARNSIDE, 2002). Fearnside (2005) analisa os danos ao meio ambiente ocasionados pela falta de controle do Estado e ressalta que depois de alcançado os avanços, um período de espera ainda seria necessário antes da pavimentação do trecho Cuiabá-Santarém.

Como o principal impacto de pavimentar a BR-163 seria o aceleramento desenfreado da destruição da floresta ao longo de seu traçado e na área de influência da rodovia, o Governo Federal criou, por Decreto, um grupo de trabalho com a finalidade de elaborar e coordenar a implementação do Plano de Desenvolvimento Sustentável para a Região de Influência da Rodovia BR-163 (BRASIL, 2004b). A iniciativa visou contribuir para uma nova abordagem no planejamento de obras de infraestrutura na região amazônica propondo estratégias para o desenvolvimento da região Norte e do Plano de Ação para a Prevenção e Controle de Desmatamento na Amazônia Brasileira. O Plano propôs a implantação de diversas políticas de cunho ambiental, como a criação de Unidades de Conservação no entorno da rodovia, e de cunho social, como a ampliação da rede de educação e saúde nos municípios impactados pela rodovia (XINGU+, 2020). A proposta foi elaborada por um grupo técnico, formado por representantes dos Ministérios do Planejamento, da Integração Nacional, do Meio Ambiente, dos Transportes e do Desenvolvimento Agrário (MMA, 2004).

A BR-163 é um dos principais corredores de escoamento da produção de soja do Mato Grosso, que é transportada para o complexo portuário de Miritituba, em Itaituba, no estado do Pará. A conclusão da pavimentação desse trecho ocorreu em fevereiro de 2020, após inúmeras paralisações, normalmente devido ao descumprimento da legislação ambiental e restrições orçamentárias (BRASIL, 2020; XINGU+, 2020).

Após a conclusão do trecho Cuiabá-Santarém, o desmatamento no entorno da rodovia, que escoar a produção agrícola do Mato Grosso aos portos do Pará, aumentou 359% em um ano, avançando sobre 1,5 milhão de hectares (GRANDELLE, 2021). Além de Altamira, a BR-163 tem o traçado em outros municípios paraenses, como Novo Progresso e São Félix do Xingu. Essas três cidades e Itaituba lideram o ranking dos municípios com os maiores índices de desmatamento do país em 2020, sendo que Altamira e São Félix do Xingu lideram a classificação (GRANDELLE, 2021) (Figura 3.5).

Cidade	Área desmatada (km²)
1 Altamira (PA)	798,2
2 São Félix do Xingu (PA)	608,28
3 Porto Velho (RO)	449,66
4 Lábrea (AM)	382,87
5 Novo Progresso (PA)	363,67
6 Itaituba (PA)	272,63
7 Apuí (AM)	259,62
8 Pacajá (PA)	247,13
9 Colniza (MT)	237,7
10 Portel (PA)	189,41
11 Novo Repartimento (PA)	154,58

Figura 3.5 – Cidades da Amazônia que mais desmataram entre julho de 2019 e agosto de 2020.
Fonte: INPE (2021).

Embora tenham sido criadas unidades de conservação na região, a pavimentação da BR-163 (Figura 3.6) as tornou atrativas para invasores, pois foi estabelecida uma infraestrutura para facilitar o escoamento da produção agrícola, conforme previsto por Fearnside (2005). O garimpo também vem rompendo os limites legais e se alastrando para o interior das áreas protegidas que compõem o mosaico da BR-163 (GRANDELLE, 2021).

Orrico Filho (2005) descreve que o transporte de madeira na BR-163 é distribuído em toras e tábuas, e realizado por caminhoneiros utilizando veículos de variadas idades e tipos, com carretas de carrocerias originalmente fabricadas para soja e adaptadas para o transporte de tábuas. Ressalta o autor que, de modo geral, são dois tipos de transporte i) para a busca de madeira em toras através dos ramais madeireiros, intitulado neste trabalho como rodovias clandestinas, e ao longo da BR-163 em direção às serrarias; ii) o transporte de tábuas entre as serrarias e as indústrias do sul do país, também para o porto de Miritituba.

De acordo com Orrico Filho (2005) os riscos de transporte normalmente são assumidos pelos caminhoneiros e, em algumas situações, pelas serrarias havendo uma grande expectativa para a diminuição do custo do frete com a pavimentação da rodovia. A redução dos custos de transporte e tempo de viagem em decorrência da melhoria das condições de tráfego proporcionada pela pavimentação da BR-163, promovendo assim maior acessibilidade, proporcionaram melhores condições para a expansão do desmatamento.



Figura 3.6 – Traçado da rodovia BR-163.

Brito e Castro (2018) descrevem que a partir do asfaltamento de parte da rodovia BR-163, o processo de ocupação da região passou a ter novos e intensos fluxos de trabalhadores e investimentos, assim como graves questões socioeconômicas e ambientais no entorno da rodovia, levando a muitos conflitos sociais. As autoras destacaram no estudo que apesar dos recursos e projetos destinados para contornar os impactos decorrentes da pavimentação da BR-163, esses não vêm resolvendo a pobreza e a má distribuição de renda que atingem a maioria, assim como têm produzido sérios riscos para a sustentabilidade humana e ambiental.

3.3.2 Rodovia Federal BR-210

A BR-210 (Figura 3.7) é uma rodovia federal transversal também denominada de Perimetral Norte. É parte do Plano de Integração Nacional e a proposta originalmente era atender a Amazônia brasileira desde o Amapá até a fronteira colombiana no estado do Amazonas (FACUNDES; LIMA; SANTOS, 2019; OLIVEIRA NETO, 2015). O traçado do projeto da rodovia percorre os estados do Pará, Amazonas, Roraima e Amapá, embora a implantação tenha ocorrido apenas nos estados do Amapá e Roraima. Com percurso total de 2.450 quilômetros de extensão, a construção da rodovia teve início em 29 de julho de 1973, mas foi paralisada em 1977 e o projeto não foi mais retomado (DAMASCENO; FILOCRE; NESTE, 2019).

A rodovia Perimetral Norte seria construída para estabelecer uma proteção da fronteira norte do Brasil e intensificar o comércio interamericano, sendo considerada uma nova Transamazônica na faixa de fronteira (OLIVEIRA NETO, 2015). A proposta seria conectar o Brasil com o Platô das Guianas (Guiana, Guiana Francesa, Suriname e Venezuela), com que finalizaria a isolação regional do norte da Amazônia, além de proporcionar a ocupação agrícola na região por meio dos projetos de colonização e também pela presença militar do Estado na Amazônia Brasileira (LIMA; PORTO, 2008).

A construção foi iniciada na cidade de Macapá, onde teve os primeiros cem quilômetros com pavimentação asfáltica e logo em seguida foi descontinuada, mas percorre até o interior da terra indígena Waiãpi, onde o trecho rodoviário no território do estado do Amapá se encerra com aproximadamente 300 km de extensão (DAMASCENO; FILOCRE; NESTE, 2019). Os autores descrevem que, em Roraima, a rodovia possui 412 quilômetros abertos e com pavimentação asfáltica, embora muitos segmentos em estado crítico de conservação. No seu trajeto roraimense intercepta as rodovias federais BR-174 e BR-432, duas rodovias estaduais, além de diversas estradas vicinais de administração municipal.

A paralisação da construção da rodovia, em 1977, foi devido à falta de recursos orçamentários provocado por questão econômica, decorrente da crise mundial provocada pela alta do preço do petróleo e os inúmeros problemas decorrentes dos conflitos com as populações indígenas. Semelhante ao que ocorreu com a BR-163, a construção da Perimetral Norte também foi responsável pela destruição de várias tribos indígenas (OLIVEIRA NETO, 2015). Em seu projeto original, a rodovia deveria recortar todo o território ocupado pelos povos indígenas Wajãpi, no Amapá e no Pará. O traçado planejado para a rodovia BR-210 cruzava diversos territórios de povos indígenas ainda não contatados pela FUNAI, inclusive grande extensão da porção sudoeste da atual Terra Indígena Yanomami. A construção da Perimetral Norte no estado de Roraima, também levou a morte de dezenas de Yawarip, subgrupo Yanomami (OLIVEIRA; SALES; LACERDA, 2021; OLIVEIRA NETO, 2015).

Rodovias do Baixo Amazonas

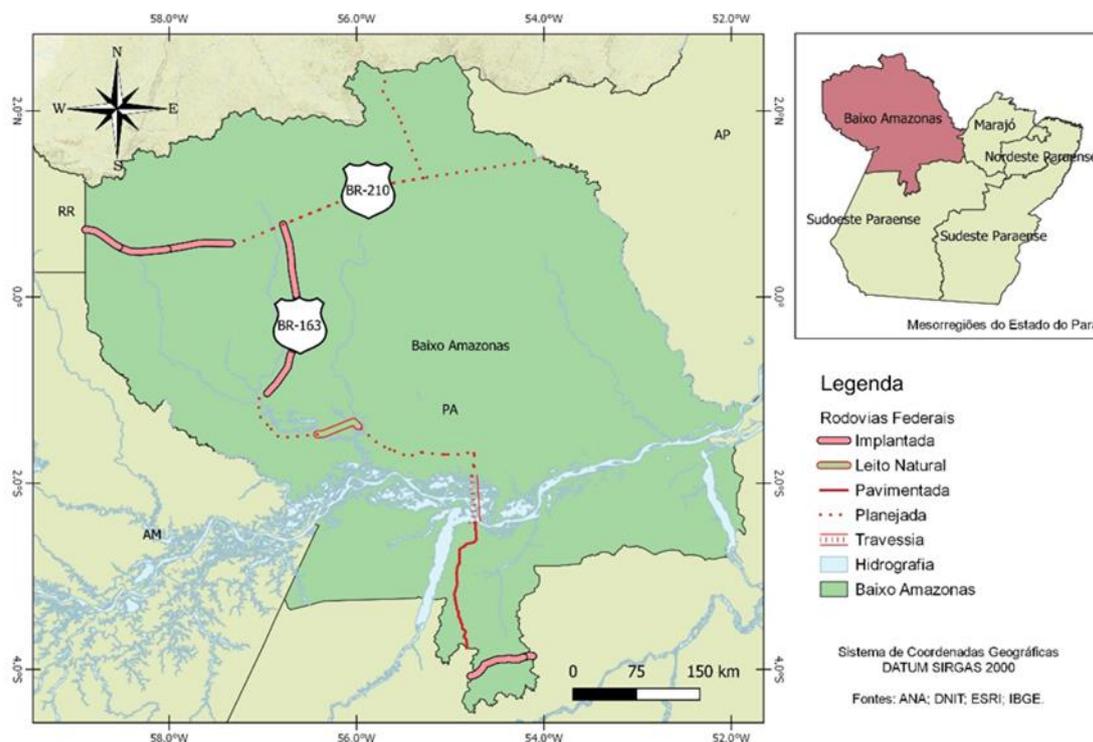


Figura 3.7 - Rodovias Federais da mesorregião do Baixo Amazonas.

3.4 Planejamento da Infraestrutura de Transporte no Pará

O Plano Nacional de Logística e Transportes - PNLT é um plano indicativo do Governo Federal em processo de reavaliação periódica que permite visualizar as necessidades do setor de transportes com foco no desenvolvimento regional e dispõe de estrutura permanente de gestão, com base em sistema de informações georreferenciadas (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 2012). A última versão do PNLT (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 2012) expressa a importância de uma matriz com maior participação dos modos aquaviário e ferroviário ressaltando o desejo em dotar a matriz de distribuição modal numa situação equilibrada fundamentada nos custos socioeconômicos e ambientais, desaprovando a predominância rodoviária na divisão modal de transportes no país.

Para o setor rodoviário, o investimento previsto é para recuperação e repavimentação da malha viária federal, estadual e construção de pontes de concreto. Vale ressaltar que a construção das rodovias BR-163 e BR-210 na região da Calha Norte não estão previstas no PNLT.

Para o setor ferroviário está prevista a construção da estrada de ferro EF-151, Ferrovia Norte-Sul, no trecho Barcarena/PA (Porto de Vila do Conde) até Açailândia/MA, com 480 km de extensão.

Embora o documento ressalte a importância de maior participação de modos de transporte mais sustentáveis, a maior parcela de investimentos para o estado do Pará destina-se ao rodoviário com uma participação em torno de 75,4% dos recursos financeiros, demonstrando um desequilíbrio na distribuição dos recursos. A Tabela 3.1 mostra os investimentos a serem realizados.

Tabela 3.1 - Portfólio dos projetos do PNLT/2011 para o estado do Pará

Modo de Transporte	R\$ (x1.000)
Aeroviário	27.750
Ferrovário	2.160.000
Terminais Hidroviários	2.536.943
Portuário	1.564.400
Rodoviário	7.790.338
Total de investimentos	10.327.281

Fonte: (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 2012).

Mediante a desatualização do PNLT, propostas para integrar e escoar a carga pelos rios da Amazônia foram construídas como o projeto Arco Norte, que consiste em viabilizar a chegada das cargas até os portos da região, sendo o escoamento da produção por eles um redutor de custo logístico. Portanto, é necessária a implantação de projetos logísticos de rodovias e ferrovias até o alcance dos rios da bacia amazônica (MONAI, 2016). Assim, além da conclusão da rodovia BR-163/PA, recentemente recuperada, o projeto também apontou como necessário restaurar as rodovias BR-155/PA e BR-158/PA e realizar intervenções de adequação de capacidade na rodovia BR-364/RO. Outras obras apontadas como fundamentais é a Ferrovia Norte-Sul até Barcarena (PA), e construção da ferrovia EF-170 (Ferrogrão), derrocar o Pedral do Lourenço, viabilizar a construção dos terminais privados em Miritituba e Vila do Conde, além de dragar, balizar e sinalizar o Rio Madeira e o Rio Tapajós (SNIZEK JÚNIOR *et al.*, 2017).

A conclusão da BR-210, objeto de estudo desta tese, também é apontada como parte do projeto Arco Norte, uma vez que ligará os estados de Roraima, Pará e Amapá, viabilizando a integração comercial com as Guianas, o Suriname e a Venezuela. A implantação de todos esses projetos provavelmente promoverá um forte incremento na taxa anual de desmatamento na região amazônica.

4 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, APRENDIZADO DE MÁQUINAS (*machine learning*) E MÉTODOS UTILIZADOS

Alan Turing, em 1950, foi o primeiro a articular uma visão completa da Inteligência Artificial (em inglês, *Artificial Intelligence* - AI) no artigo intitulado “*Computing Machinery and Intelligency*”. Esse artigo é considerado um marco histórico como a proposta inicial para a computação moderna (PRATA, 2019). Ele apresentou o Teste de Turing, onde investigou a capacidade de uma máquina exibir comportamento inteligente equivalente a um ser humano, ou indistinguível deste. O cientista propôs em uma das seções o termo “*learning machines*”, para descrever que uma máquina pode “aprender a aprender”. Turing (1950) descreve como a mente humana não é diferente de um complexo maquinário puro, no caso em que o fenômeno da mente humana fosse perfeitamente desvendado, adentrando as várias camadas cognitivas que formam o pensamento humano. Ele também sugere que experimentos seriam realizados no final daquele século, que nos apresentariam respostas para o processo de aprendizado de máquinas.

O termo Inteligência Artificial (IA) foi utilizado pela primeira vez em 1956, na famosa conferência de *Dartmouth*, que reuniu pesquisadores de diferentes áreas para discutir o tema (NILSSON, 2009 apud PRATA, 2019). De acordo com Kaplan e Haenlein (2019) IA é definida como “a habilidade de um sistema em interpretar corretamente dados externos, aprender com estes dados e usar esse aprendizado para atingir alguns objetivos e tarefas, por uma adaptação flexível”.

4.1 Aprendizado de Máquinas

O termo *machine learning* (em português, aprendizado de máquinas - AP) foi primeiramente utilizado por Samuel (1959) ao descrever uma máquina que jogava Damas. Essa máquina utilizava um modelo que gerava uma árvore de decisões baseada em pesos e somas de recompensas definidas por funções matemáticas, sendo ele ainda útil em inteligência artificial na atualidade, por conta de sua proposta simples e intuitiva.

Aprendizado de Máquinas é um subcampo da Inteligência Artificial e diferente de sistemas especializados, que utilizam instruções explícitas, ele depende de inferência, reconhecimento de padrões e estimativas. Ao acessar e observar dados com diferentes técnicas, essa proposta é capaz de identificar padrões e, como o nome sugere, aprender com eles. Ao usar esse tipo de aprendizado, o sistema é capaz de performar com

moderada facilidade tarefas que consumiriam demasiado tempo e procedimentos computacionais, caso fossem executadas das formas algorítmicas tradicionais (EXPERTSYSTEM, 2020; RUSSEL; NORVIC, 2010; SAMUEL, 1959). É uma parte essencial da IA, que descreve métodos que ajudam computadores a aprender, sem a necessidade específica de serem programados (KAPLAN; HAENLEIN, 2019 apud PRATA, 2019).

As variadas aplicabilidades conquistadas pelo aprendizado de máquinas começaram no século XX e aumentaram expressivamente no século XXI. *Machine learning* tem sido utilizado para resolver problemas e automatizar tarefas, existindo múltiplos exemplos de aplicações usando diferentes ramos e técnicas de algoritmos nos campos da matemática, engenharia, computação, medicina e biologia (GARDNER; DORLING, 1998; LECUN; HUANG; BOTTOU, 2004; MOREIRA; ROISENBERG, 2016).

Os algoritmos de aprendizagem de máquina provêm a sua base tecnológica e são utilizados para extrair informações a partir de dados em bancos de dados, trazendo à tona os padrões implícitos e relações existentes entre eles (LECUN; HUANG; BOTTOU, 2004). Estes padrões identificados são úteis para poder realizar previsões futuras, classificações e encontrar padrões de associações entre conjuntos de dados.

Primeiramente, um modelo matemático é construído, definido como *training data*. Ele é então utilizado como entrada em um algoritmo que, junto com parâmetros pré-definidos e pesos, é capaz de reconhecer padrões e classificar dados, assim como resolver problemas de acordo. As técnicas fundamentais podem variar moderadamente dependendo do tipo de aprendizado utilizado e do problema alvo que está sendo resolvido.

Russel e Norvic (2010) sugerem que aprendizado de máquina é "a habilidade da máquina de se adaptar a novas circunstâncias, detectar e extrapolar padrões", mencionado como uma das habilidades essenciais para se passar no Teste de Turing, considerando que tal teste fora planejado para determinar se as respostas a dadas perguntas estão sendo respondidas por um humano ou por uma máquina.

Com o passar dos anos, o poder computacional tornou-se exponencialmente maior e aplicabilidades para aprendizado de máquina de maior escala começaram a ser consideradas. Assim como previsto por Turing (1950), as aplicações expandiram-se para resolver problemas não apenas de jogos, mas das mais variadas áreas de matemática, física, engenharia, medicina e até mesmo artes (GARDNER; DORLING, 1998; LECUN; HUANG; BOTTOU, 2004; MOREIRA; ROISENBERG, 2016; OPENANN, 2020).

Como consequência dos avanços na área, o aprendizado de máquinas foi dividido em diferentes tipos. Aborda-se neste trabalho o Aprendizado Supervisionado, o Aprendizado Não Supervisionado e o Método Ensemble.

4.1.1 Aprendizado Supervisionado

A ideia do Aprendizado é a atividade em que um agente, através de observações de entrada em um sistema, pode melhorar seu desempenho para uma tarefa futura. As tarefas passadas são realizadas automaticamente pelo sistema, supondo que os engenheiros não podem prever todos os estados e mudanças que dado sistema pode sofrer e até mesmo em casos que estes não saibam como encontrar a solução para o problema. Uma formalização matemática de Aprendizado Supervisionado seria dado por um conjunto de treinamento de “n” exemplos de pares de entrada e saída (Equação 1).

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n) \quad (1)$$

Onde cada y_j foi gerado por uma função desconhecida $y = f(x)$, o objetivo é descobrir a função h , que nada mais é do que uma das possíveis respostas no espaço de busca, que aproxima a função verdadeira “ f ”.

O conjunto “ x ” é o conjunto de entradas no sistema, podendo assumir quaisquer valores, não necessariamente números; o conjunto “ y ” é o conjunto de saídas no sistema e, assim como “ x ”, pode ser qualquer valor. Quando a saída “ y ” é um de um conjunto finito de valores, o problema é chamado de problema de classificação. Podendo ser especificado como uma classificação booleana ou binária, se os resultados possíveis forem limitados a apenas dois valores. Quando “ y ” é um número, o problema de aprendizado é chamado de regressão (HAGAN; DEMUTH; BEALE, 2014; RUSSELL; NORVIG, 2010).

4.1.2 Aprendizado Não Supervisionado

O caso do Aprendizado Não Supervisionado é semelhante ao dos métodos supervisionados, porém, nesse caso, o agente aprende padrões mesmo sem um retorno explícito especificado. Uma aplicação comum é através do *clustering*, que é uma forma de aprendizagem Não Supervisionada que os cientistas costumam utilizar quando tem uma grande quantidade de dados não etiquetados (DATASCIENCE, 2019). Nesse caso,

eles são organizados em grupos chamados *clusters* que possuem semelhanças em seus valores. Logo, é útil para organizar automaticamente múltiplas categorias em uma coleção de objetos.

Um exemplo recorrente é utilizar imagens de raio-x de braços de diferentes pessoas e organizá-las automaticamente em grupos anatómicos similares para facilitar a criação de próteses. Como não é conhecido exatamente como organizar esse tipo de dado, o algoritmo imediatamente procura semelhanças entre eles e os divide em grupos (RUSSEL; NORVIC, 2010).

Mathworks (2020) fornece um exemplo em que a expressão gênica de fermento biológico é processada por análise de componentes principais e plotada em um gráfico (Figura 4.1), que é então separada em grupos de posições dependendo de seus pesos, utilizando o algoritmo *Self-Organizing Map* de Aprendizado Não Supervisionado. Nesse caso, observam-se as posições de pesos na análise de componentes principais de fermento biológico, verificando-se onde os dados são mais expressivos nessa expressão gênica (MATHWORKS, 2020).

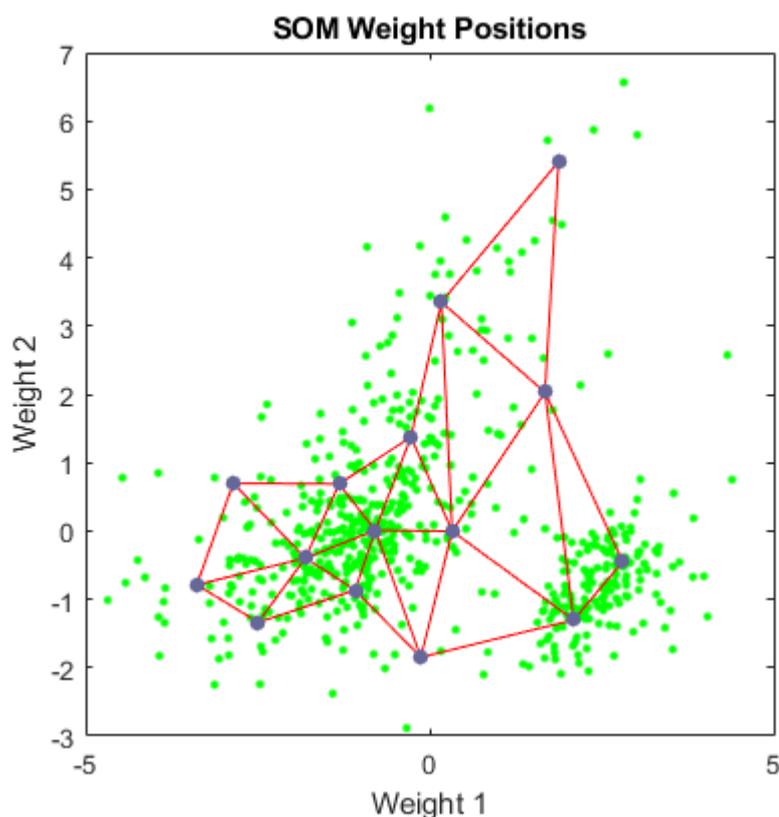


Figura 4.1 - Exemplo de expressão gênica de fermento biológico processada por análise de componentes principais.
Fonte: Mathworks (2020).

4.1.3 Métodos *Ensemble*

No caso dos métodos ensemble, a proposta trata-se de construir um conjunto de hipóteses, ao invés de utilizar apenas uma hipótese h , chamadas de *Ensemble*. O método então escolhe um conjunto de pesos e constrói um classificador para “votar” nas hipóteses. Tais termos são definidos nas Equações de 2-4.

$$\{h_1, \dots, h_k\} \quad (2)$$

$$\{w_1, \dots, w_k\} \quad (3)$$

$$H(x) = w_1 h_1(x) + \dots + w_k h_k(x) \quad (4)$$

A decisão do classificador $H(x)$ é então definida por 1 se $H(x) \geq 0$ e -1 caso contrário. Experimentos demonstraram que esses métodos costumam ser muito mais precisos quando comparados com os modelos de uma única hipótese.

4.2 *Random Forest*

O *Random Forest* (RF) é um classificador que utiliza árvores de decisão (em inglês, *Decision Trees*) e tem sido utilizado para classificação, regressão e pelo seu potencial em apresentar a importância das variáveis do modelo. Segundo Breiman (2001) é uma ferramenta eficaz de previsão. É classificado como um algoritmo de aprendizado de máquina flexível e fácil de usar, que produz um ótimo resultado na maioria das vezes. É também um dos algoritmos mais utilizados, pela sua simplicidade e diversidade, podendo ser utilizado tanto para tarefas de classificação como de regressão (BUILTIN, 2019).

O principal conceito do algoritmo RF é a criação de uma “floresta de decisão”, que consiste em um conjunto de combinações de árvores de decisões individuais, criadas por amostras compostas por observações e variáveis, extraídas aleatoriamente dos dados originais de treinamento. Esse processo, em inglês, é chamado de *bagging*, e consiste em seleções aleatórias com reposição, ou seja, as amostras podem ser extraídas mais de uma vez em cada seleção (BREIMAN, 2001). Segundo o autor, para cada observação dos dados em que será feita a predição, é atribuída uma classificação, estimada pela combinação das classificações de árvore individuais. A cada identificação de uma árvore individual é contabilizado um voto, e a classificação final é atribuída à classe com maior votação.

Desenvolvido por HO (1995), é um algoritmo capaz de criar várias árvores de decisão não correlacionadas ainda na etapa de treinamento e utilizar as saídas de cada

uma delas para o aperfeiçoamento da capacidade de classificação dos dados. Em problemas de regressão, a saída do modelo é dada pela média das saídas de cada árvore de decisão construída na fase de treinamento do *Random Forest* (Figura 4.2). Logo, seja f_b uma árvore de decisão, onde $b = 1, 2, \dots, N$, sendo N o número de estimadores construídos, os dados de saída são preditos pelo modelo com base na entrada “ x ”, sendo dada pela Equação (5).

$$y = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_b(x) \quad (5)$$

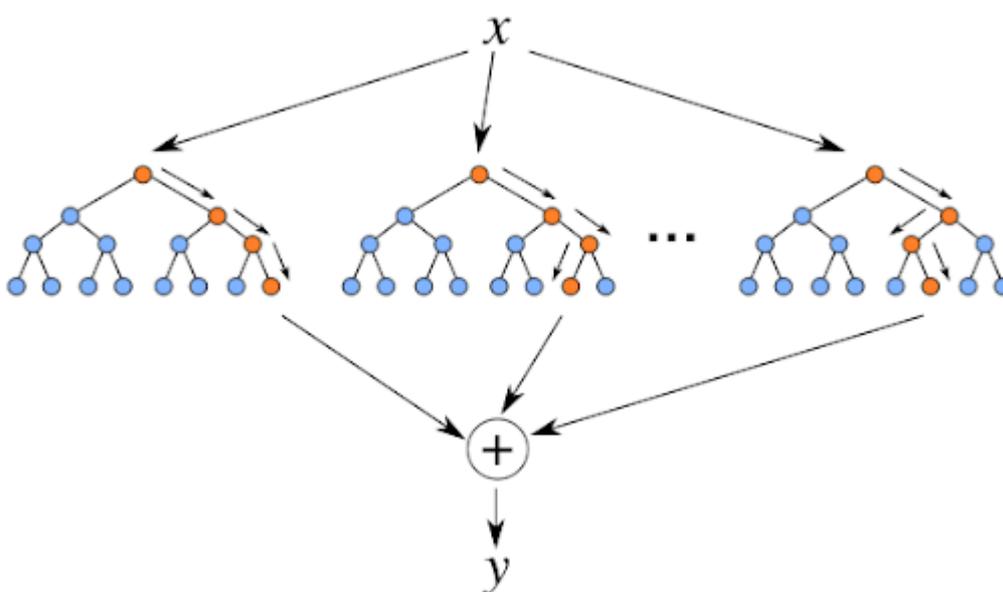


Figura 4.2 - Representação do modelo *Random Forest*.
Fonte: HO (1995).

As árvores de decisão são estruturadas de forma a relacionar pontos de acordo com a lógica do problema, onde cada ponto é chamado de nó e, caso possua um nó subsequente, este será chamado de “nó-filho” e o anterior a este, será chamado “nó-pai”. Em uma árvore binária cada nó deve possuir 0, 1 ou 2 filhos.

A criação de uma árvore de decisão é baseada no ganho de informação ao realizar a repartição de um nó com base em um atributo. A repartição dos nós é feita com o objetivo de obter um maior ganho de informação a cada divisão. O ganho de informação para um recurso “ f ” é dado ao repartir um nó Dp , como mostrado na Equação (6). A profundidade da árvore é um parâmetro de escolha.

$$IG(D_p, f) = I(D_p) - \sum_{i=0}^{N-1} \frac{N_i}{N_p} \times I(D_i) \quad (6)$$

Onde:

D_i são os conjuntos de dados do i-ésimo nó-filho;

$I(D)$ é uma medida de impureza;

N_p é o número de amostras do nó pai;

N_i é o número de amostras do nó filho.

Random Forest adiciona um padrão aleatório extra ao modelo no momento de criação das árvores. Seu principal foco, além de procurar pela melhor característica ao fazer a partição dos nós internos, procura também a melhor característica em um subconjunto aleatório delas. Isso favorece a geração de modelos robustos, pois leva a uma grande diversidade ao gerar árvores de decisão não correlacionadas. Além disso, é um algoritmo que permite medir a relevância de uma característica para generalização do modelo (LOUPPE, 2014).

A importância de uma variável é representada por um valor percentual que indica o quanto a mesma é escolhida para a divisão do nó raiz de uma Árvore de Decisão, i.e., dentro do conjunto de estimadores criados pelo *Random Forest* (LOUPPE, 2014). É importante ressaltar que a divisão do nó raiz é obtida pelo maior ganho de informação após a divisão, ou seja, depende diretamente da diminuição da impureza da árvore. A sua medida é um dos métodos usados em algoritmos de árvore de decisão para decidir a divisão ideal de um nó raiz e as divisões subsequentes. Para as árvores de regressão, a medida de impureza é chamada de redução da variância a qual representa a redução da variância da variável dependente em cada nó (PIANUCCI; PITOMBO, 2019).

A redução da variância, que representa a função de impureza, é apresentada na Equação (7).

$$I_V(N) = \frac{1}{|S|^2} \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} \frac{1}{2} (x_i - x_j)^2 - \left(\frac{1}{|S_t|^2} \sum_{i \in S_t} \sum_{j \in S_t} \frac{1}{2} (x_i - x_j)^2 + \frac{1}{|S_f|^2} \sum_{i \in S_f} \sum_{j \in S_f} \frac{1}{2} (x_i - x_j)^2 \right) \quad (7)$$

Onde:

$I_V(N)$ é a redução da variância no nó N;

S é o conjunto da amostra de teste;

S_t é o conjunto da amostra teste do qual o valor da variável explicativa é verdadeiro;

S_f é o conjunto da amostra teste do qual o valor da variável explicativa é falso;

X_i é o valor da variável dependente da amostra teste;

X_j é o valor da variável dependente da amostra que compõe o nó N .

O algoritmo *Random Forest*, caso não seja bem definido, não apresenta riscos de sofrer *overfitting*, ou seja, se tornar tendencioso, além de ser um algoritmo capaz de obter um nível de confiança aceitável ao gerar modelos baseados em *dataset* com uma pequena quantidade de dados disponíveis (LOUPPE, 2014).

4.3 Coeficiente de Correlação de Pearson

Os coeficientes de correlação são métodos estatísticos para se medir as relações entre variáveis e o que elas representam. O coeficiente de correlação de Pearson mede a correlação linear entre duas variáveis, e pode assumir apenas valores entre -1 e 1, sendo (-1) fortemente correlacionadas negativamente e (1) fortemente correlacionadas positivamente; um valor de correlação próximo de zero indica que não há relação entre as duas variáveis (OPER, 2020). O coeficiente indica a interdependência entre duas variáveis, ou seja, se uma variável tende a aumentar à medida que as outras diminuem, o coeficiente é negativo e, se as duas variáveis tendem a aumentar em conjunto, o coeficiente de correlação é positivo. O cálculo do coeficiente de correlação de Pearson, mostrado na Equação (8), serve para indicar o grau de correlação entre as variáveis quando não se é facilmente compreendida sua interdependência (ARAUJO; SANTOS; GOMES, 2020).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)S_x S_y} \quad (8)$$

Onde:

\bar{x} é a média da amostra para a primeira variável;

\bar{y} é a média da amostra para a segunda variável;

S_x é o desvio padrão para a primeira variável;

S_y é o desvio padrão para a segunda variável e

n é o número de amostras.

4.4 Coeficiente de Correlação de Spearman

O coeficiente de correlação de Spearman é uma medida não paramétrica da correlação de postos, sendo comum o uso para análise de dados (SHIMAKURA, 2005). A correlação de Spearman avalia a relação monotônica entre duas variáveis contínuas ou ordinais. Em uma relação monotônica, as variáveis tendem a mudar juntas mas não necessariamente a uma taxa constante. O cálculo do coeficiente de correlação de Spearman é mostrado na Equação (9).

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_i d_i^2}{n(n^2-1)} \quad (9)$$

Onde:

ρ é o coeficiente de correlação de Spearman;

n é o número de pontos de dados das duas variáveis;

d_i é a diferença de alcance do elemento "n".

5 METODOLOGIA

5.1 Área de Estudo

A região de estudo é o estado do Pará (Figura 5.1), segunda maior unidade federativa do Brasil em extensão territorial e a mais povoada e desmatada da Amazônia, com uma área de 1.245.759,30 km², população de 8.602.865 habitantes, IDH de 0,646 e densidade demográfica de 6,07 habitantes/km², representa 14,66% do território brasileiro (8.511.965 km²), 26,43% da Amazônia legal (4.720.677,52 Km²), 17,85% da Amazônia (6.990.197,13 km²) e enfrenta sérios problemas sociais e ambientais, principalmente no interior (BRASIL, 2019a, 2019b). O Pará possui o maior estuário do planeta e florestas que ocupam cerca de dois terços do território do estado, quase 9% das florestas tropicais do mundo, que abrigam mais de 300 bilhões de árvores nativas, uma das maiores diversidades do planeta e que conservam grandes estoques de carbono (IMAZON, 2012).

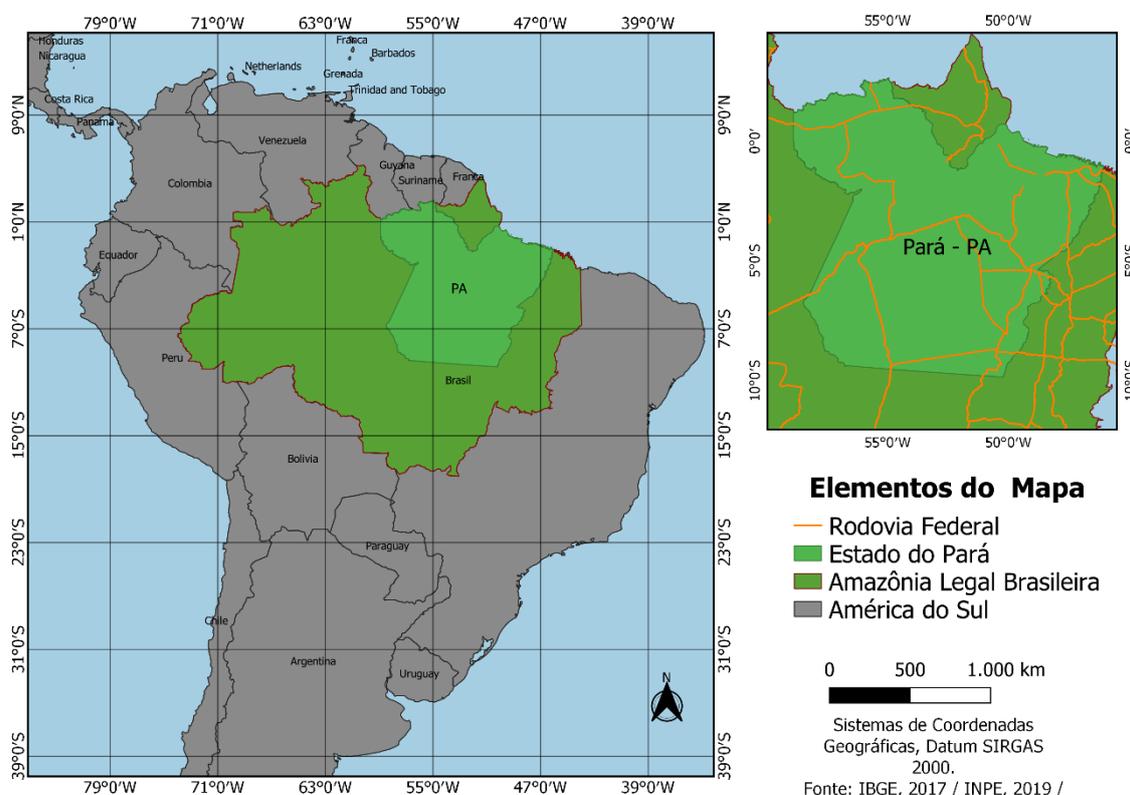


Figura 5.1 - Mapa de localização do estado do Pará.

5.2 Etapas do Modelo

A seleção das variáveis relacionadas ao objeto de pesquisa seguido da elaboração do banco de dados foi o primeiro passo para construção do modelo. Portanto, foram selecionadas dez variáveis, sendo elas: rede rodoviária, rede rodoviária clandestina, área desmatada, população, renda domiciliar per capita, taxa de desemprego, homicídios, produto interno bruto, exportação e índice de analfabetismo. A variável ambiental (área desmatada) foi definida como a variável de saída do modelo, isto é, a variável dependente.

Na etapa seguinte foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson e de Spearman para verificação da correspondência existente entre as variáveis e a área desmatada. O coeficiente de correlação de Pearson está disponível no software da biblioteca de aprendizado de máquinas utilizado, e o de Spearman foi calculado separadamente. Em seguida, foi realizado o processamento dos algoritmos de aprendizado de máquinas *Random Forest*, *K-Nearest Neighbor* e *Decision Trees*. Os indicadores apontaram o modelo *Random Forest* como o de melhor desempenho e a partir dos resultados gerados pelo algoritmo foi realizado o cálculo do percentual de importância das variáveis. Todas essas etapas foram executadas pelo *software* da biblioteca *open-source*.

Com a curva de desmatamento fornecida pelo algoritmo *Random Forest* foi realizada previsão de desmatamento até 2050, utilizando os modelos de regressão pelo método dos mínimos quadrados e de Holt-Winters, este último avalia a sazonalidade dos dados. Subsequente a isso foi feita uma análise comparativa entre esses modelos de previsão de desmatamento e realizado o cálculo do erro das previsões para o ano de 2020.

A partir do modelo *Random Forest* foi efetuada uma previsão de área desmatada considerando a implantação de novas rodovias. Portanto, utilizando como recurso matemático a análise de sensibilidade, aplicado ao modelo *Random Forest* desenvolvido, foi possível estabelecer índices que correlacionam a extensão prevista para as rodovias com a área a ser desmatada. As estimativas de desmatamento consideraram a implantação do prolongamento das rodovias BR-163 e BR-210 previstas na região da Calha Norte, no estado do Pará. A Figura 5.2 mostra as etapas do modelo desenvolvido.

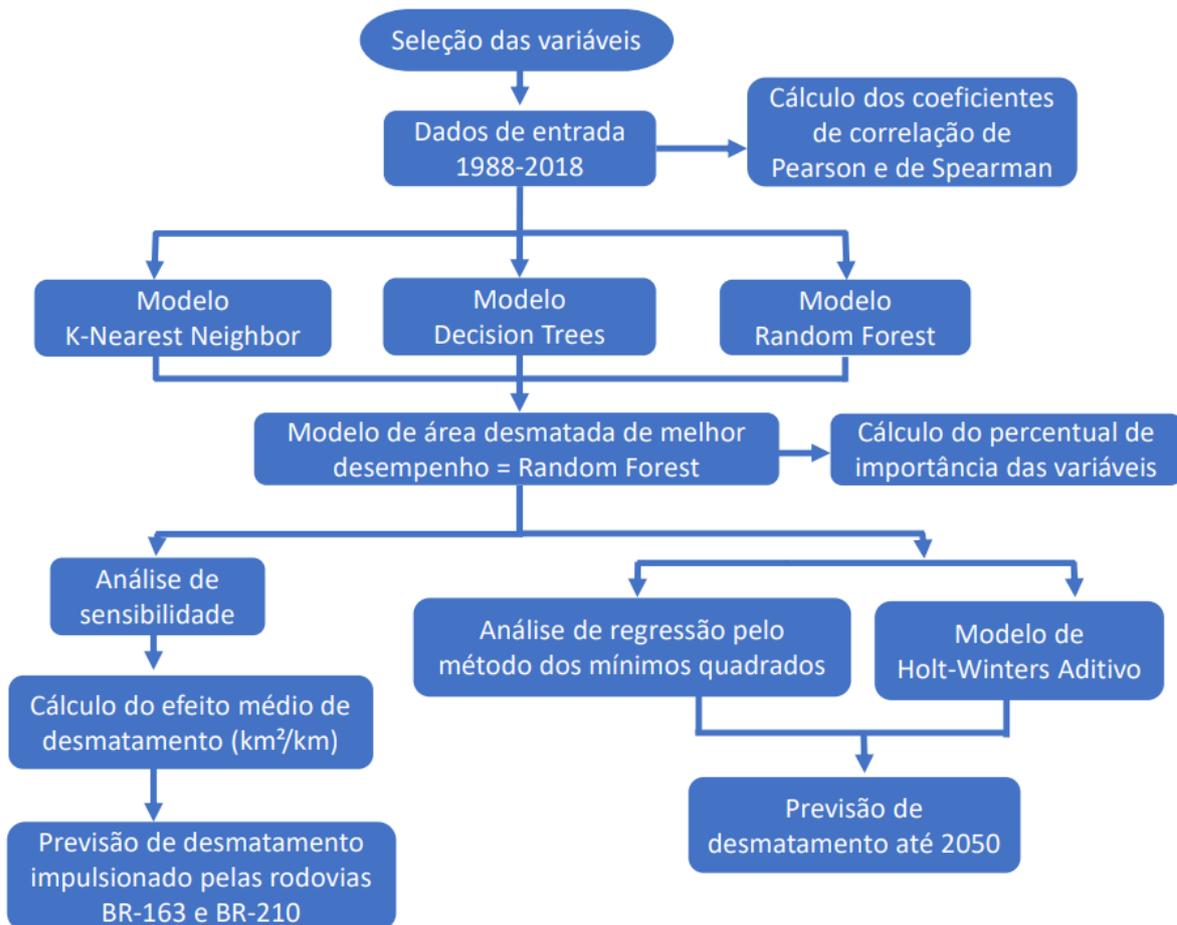


Figura 5.2 – Fluxograma com as etapas do modelo.

5.3 Seleção das Variáveis Independentes

O desmatamento na Amazônia é provocado pela interação complexa de diversos fatores (VERBURG *et al.*, 2014), por isso a escolha das variáveis utilizadas neste trabalho foi baseada em estudos anteriores, que as apontaram como influentes no processo de desmatamento, assim como na disponibilidade de dados existentes. Estudos de natureza qualitativa indicam os seguintes agentes como causadores do desmatamento: a expansão do sistema rodoviário, PIB, população, governança política, avanço da fronteira agrícola e variáveis relacionadas às condições socioeconômicas, ressaltando que populações pobres exercem maior pressão sobre sua base de recursos naturais com repercussões ambientais imediatas (ARRAES; MARIANO; SIMONASSI, 2012; FEARNSSIDE, 2020; MEIJER *et al.*, 2018). Por conseguinte, foram selecionadas as variáveis: renda, desemprego, homicídios e analfabetismo, pela sua relação com as condições socioeconômicas e a disponibilidade de dados.

Sant'Anna e Young (2010) utilizaram dados estatísticos sobre violência, medidos pelas taxas de homicídios, desmatamento, densidade populacional, entre outras variáveis socioeconômicas, disponíveis para 575 municípios da Amazônia Legal e os resultados comprovaram que desmatamento e violência estão associados e corroboram com a hipótese de que ambos resultam de uma má definição dos direitos de propriedade.

Estudos quantitativos que relacionam as variáveis responsáveis pelo desmatamento são incomuns. Ângelo e De Sá (2007) avaliaram a influência de diversos fatores socioeconômicos no processo de desmatamento da Floresta Amazônica, numa série histórica de 1980 a 1999, utilizando métodos de análises de correlação, multivariada e de regressão simples. Dentre outras, malha viária, população e PIB foram variáveis identificadas como importantes para explicar o processo de desmatamento por Ângelo e De Sá (2007), posição também compartilhada por Barber *et al.* (2014); Ferrante e Fearnside (2020) e Laurance *et al.* (2001). Destarte, essas variáveis foram inseridas neste trabalho.

Para Arraes; Mariano e Simonassi (2012) as causas do desmatamento na Amazônia ainda não são completamente compreendidas e a identificação delas é afetada por inúmeros fatores, como a baixa qualidade dos dados, a abordagem metodológica, a distinção entre desmatamento e expansão da fronteira agrícola e a identificação de áreas próprias para extração de madeira. As variáveis consideradas nesta tese referem-se aos agentes que promovem o desmatamento e que dispõem de banco de dados, sendo a análise focada na influência da rede de transporte rodoviário, considerado um fator promotor da devastação, de natureza distinta das atividades desenvolvidas na região desmatada.

5.4 Caracterização da Rede de Transporte

A rede de transporte estudada abrange a rede rodoviária do Sistema Nacional de Viação (SNV), formado pelas rodovias federais e estaduais, a malha viária vicinal e as estradas ilegais, essas duas últimas denominadas nesse trabalho como rede clandestina, pelo fato de não fazer parte do SNV e do banco de dados dos órgãos governamentais. A rede clandestina interliga-se ao SNV, predominantemente ao subsistema rodoviário, formando uma densa rede viária no entorno das rodovias da Amazônia Oriental (Figura 5.3) que, embora precárias, integradas com a rede oficial, possibilitam a retirada de cobertura vegetal da Amazônia para a realização de atividades exploratórias, como a exploração madeireira, atividade pecuária e agroindustrial

(BARBER *et al.*, 2014; BRANDÃO; SOUZA, 2006; COSTA, 2017; MOUTINHO; GUERRA, 2016).

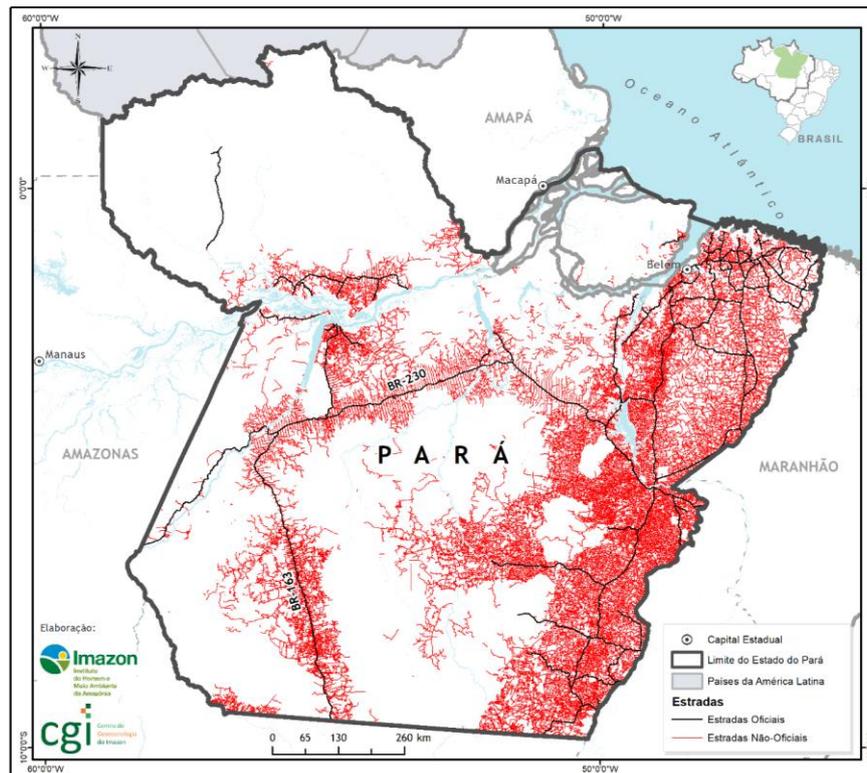


Figura 5.3 - Registros do satélite *Landsat* da malha rodoviária clandestina.

Fonte: Imazon 2020.

É por meio dos sistemas de transporte que as variadas relações sociais e econômicas podem se tornar efetivas, desde os mais importantes fluxos comerciais internacionais, movimentações de pessoas e cargas de natureza regional e urbana, até mesmo cargas responsáveis pela geração de grandes impactos ambientais negativos, tais como madeira de origem ilegal comumente transportada em toras e em tábuas pelas estradas da Amazônia (ORRICO FILHO, 2005). A relação da malha rodoviária e das vias navegáveis com o desmatamento da Amazônia foi investigado por Barber *et al.* (2014), abrangendo as estradas não oficiais e identificou que o desmatamento era muito mais alto perto de estradas e rios do que em outras partes da Amazônia, e que aproximadamente 95% dele ocorreu a uma distância de 5,5 km de estradas e 1 km de rios. Ao todo foram identificados cerca de 190.000 km de estradas não oficiais, comprovando o crescimento dessa malha viária na Amazônia (BARBER *et al.*, 2014; BRANDÃO; SOUZA, 2006). Nesses estudos e outros desta natureza são utilizadas imagens Landsat para identificar, mapear e quantificar estradas na Amazônia. Para a

análise, o mapeamento utiliza imagens do satélite *Landsat*, *CBERS* e *ResourceSat* para cartografar e quantificar as áreas desmatadas maiores que 6,25 hectares.

5.5 Variáveis Socioeconômicas, de Infraestrutura e Ambiental

O estudo avaliou uma série temporal de 30 anos, de 1988 a 2018, e dez variáveis distintas relacionadas à infraestrutura rodoviária e variáveis de natureza social, ambiental e econômica. As variáveis de infraestrutura são: a extensão da rede rodoviária federal e estadual e a extensão da rede rodoviária clandestina do estado do Pará; a variável ambiental é a área desmatada; as variáveis sociais avaliadas foram: população, taxa de desemprego, número de homicídios e índice de analfabetismo. Com relação às variáveis econômicas, foram consideradas a renda domiciliar per capita, o produto interno bruto (PIB) e as exportações em valores monetários. Os dados relacionados ao Sistema Nacional de Viação foram fornecidos pela base de dados do site do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (BRASIL, 2019c) e, com relação à extensão da rede rodoviária clandestina, esses dados foram estimados a partir de levantamentos em estudos anteriores realizados usando imagens do satélite *Landsat* e fornecidos pelo Imazon (Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia). Realizaram-se consultas em órgãos públicos e em bases de dados disponíveis na *World Wide Web*. As fontes de dados foram fornecidas pelos sites de instituições governamentais (BRASIL, 2019b, 2019a). Por fim, as taxas anuais de desmatamento foram extraídas no banco de dados do site do INPE (2019).

5.5.1 Coleta de Dados

A pesquisa foi realizada com dados secundários quantitativos e, como a maioria de estudo dessa natureza, parte das variáveis consideradas não dispunha de todas as informações para a série temporal desejada, o que fez necessária a adoção de estratégias a fim de preencher as lacunas do banco de dados.

A primeira estratégia foi a média aritmética, a qual adotada nos casos em que havia uma lacuna entre dois dados existentes. Uma outra estratégia foi a repetição do valor anterior. Esta medida foi adotada para variáveis com pouca alteração nos últimos anos, como a variável da rede rodoviária, que nos últimos dez anos teve um crescimento de 4,35%. A terceira estratégia foi o uso de interpolação para definição das variáveis inexistentes. Este método é equivalente à média aritmética, uma vez que ambas são medidas de tendência central. A opção utilizada nos casos em que a lacuna não estava

entre dados conhecidos, ou seja, isolados no início ou no fim da série temporal, foi realizada extrapolação.

Para as informações necessárias e que não estavam disponíveis nos sites institucionais, foi realizada consulta ao Sistema de Acesso à Informação, do Governo Federal. As solicitações são encaminhadas aos órgãos governamentais responsáveis e respondidas aos usuários num prazo de 15 dias úteis. Todas as respostas foram indicações de *links* que já haviam sido consultados, reafirmando sobre a inexistência dos dados requeridos, respaldando a necessidade de estimar os dados inexistentes.

5.5.1.1 Extensão da Rede Rodoviária

As informações referentes à extensão das redes rodoviárias federal e estadual foram extraídos de planilhas dos sites institucionais do DNIT (2019) e do MINFRA (2019), sendo os dados de extensão da rede rodoviária dos anos 2001 a 2009 no site do DNIT e os do período de 2010 a 2017 no site do MINFRA.

Diante disso, havia uma lacuna de informações para os anos de 1988 a 2000. Para estimativa desses dados, foi realizada interpolação. Essa estratégia foi adotada mediante o comportamento similar às funções lineares dos dados existentes.

Para o ano de 2018 não se obteve informações, portanto, foi adotada a repetição da informação do ano anterior, uma vez que houve alteração de apenas 1,84% nos cinco anos anteriores. Os investimentos recentes em infraestrutura rodoviária no estado do Pará são em manutenção e conservação da rede viária existente, sem expansão da malha.

5.5.1.2 Extensão da Rede Rodoviária Clandestina

A extensão da rede rodoviária clandestina é um dado desconhecido, embora alguns estudos apontem relação entre ela e a rede oficial. Dessa forma, o Imazon, a partir de levantamentos realizados por meio de imagens de satélite, disponibilizou, especialmente para este estudo, todos os dados existentes de extensão da rede clandestina, ou seja, referente aos anos de 2003, 2007, 2008, 2010 e 2012.

Diante disso, foram realizadas estimativas para os demais anos. Para 2004, 2005, 2006, 2009 e 2011, foram aferidas as médias aritméticas, onde para 2009 e 2011 foram utilizados os anos imediatamente inferiores e superiores. Para 2005, adotou-se os anos de 2003 e 2007. Por fim, para 2004 e 2006, utilizou-se os valores correspondentes aos anos imediatamente anteriores e posteriores, considerando o valor encontrado para o ano de 2005.

Para a estimativa dos anos anteriores a 2003, foi realizado extrapolações exponenciais utilizando os valores já encontrados para o período entre 2003 e 2010. Elas foram realizadas individualmente para cada ano e executadas em ordem decrescente, onde cada nova extrapolação levou em consideração os valores encontrados na extrapolação passada. Por exemplo, o ano de 2002 foi a primeira extrapolação realizada e levou em consideração o período de 2003 a 2010, seguido do ano de 2001, que levou em consideração o período de 2002 a 2010 e assim por diante.

A extrapolação do período de 2013 a 2018 também foi exponencial e seguiu o mesmo critério. O período utilizado para a primeira projeção foi de 2007 a 2012.

Para a projeção até o ano de 2050, foi utilizado duas estratégias: até 2020 adotou-se o mesmo valor encontrado para 2018; de 2021 a 2050, foi realizada uma projeção exponencial em ordem crescente, utilizando todos os dados dos anos anteriores.

5.5.1.3 Área Desmatada

Os dados relativos ao desmatamento foram extraídos da base PRODES, divulgada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2019b), onde foi possível obter todos os dados para o período em estudo, uma vez que o programa iniciou em 1988. Os dados utilizados de área desmatada são do PRODES e estão disponíveis na plataforma Terra Brasilis, desenvolvida pelo mesmo Instituto.

5.5.1.4 População Residente

Para determinação da população residente, foram utilizados os dados dos Censos de 1991, 1996, 2000, 2007, 2010, retirados de planilhas geradas no site da base de dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (BRASIL, 2019b). Para o restante dos anos, ou seja, os períodos intermediários de 1992 a 1995, 1997 a 1999, 2001 a 2006, 2008, 2009 e 2011 a 2018, as informações foram coletadas no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (BRASIL, 2019a). Para 1988, 1989 e 1990, foi realizada extrapolação exponencial. Esta função foi escolhida pelo comportamento observado ao considerar dados de décadas passadas.

O estudo considerou a população total do estado do Pará, isto é, a população rural e urbana, tendo em vista que as rodovias analisadas (RN) são federais e estaduais e atravessam centros urbanos e zonas rurais. Na década de 1980 a população era distribuída em 51% rural e 49% urbana, enquanto em 2018, o cenário era 68,5% urbana e 31,5% habitantes da zona rural (BRASIL, 2019c, 2019b). Nota-se que o processo de

urbanização provocou um crescimento de apenas 9,7% da população rural ao longo desses 30 anos.

5.5.1.5 Renda Domiciliar Per Capita Média

A variável renda domiciliar per capita média também teve suas informações obtidas a partir de planilhas geradas no site do IPEADATA (2014). Entretanto, não foram encontradas informações para os anos de 1991, 1994, 2000, 2010 e de 2015 a 2018.

Para o preenchimento das lacunas, foi adotada a média aritmética dos valores correspondentes aos anos anteriores e posteriores dos anos 1991, 1994 e 2000. Para os períodos de 1988 a 1990 e 2015 a 2018, foi realizada extrapolação exponencial.

5.5.1.6 Taxa de Desemprego

A taxa de desemprego foi obtida por meio de planilhas do IPEADATA (BRASIL, 2019b) com dados do IBGE (BRASIL, 2019a). Esta variável leva em consideração todos os cidadãos que procuram uma ocupação profissional remunerada, ou seja, é a porcentagem de pessoas da força de trabalho que estão desempregadas.

5.5.1.7 Homicídios

Os números de homicídios foram obtidos por meio de planilhas geradas no site do IPEADATA (BRASIL, 2019b), o qual utilizou dados fornecidos pelo Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS). A fonte utilizada não possuía dados para o ano de 2018, diante disso optou-se por realizar uma extrapolação exponencial a fim de preencher a informação inexistente.

5.5.1.8 Produto Interno Bruto (PIB)

A variável Produto Interno Bruto (PIB) estadual foi construída com base em dados do IBGE, os quais foram acessados por meio da base de dados do IPEA (BRASIL, 2019b). A unidade utilizada foi o real em milhar [R\$ (mil)] a preços constantes de 2010, sendo os demais anos corrigidos segundo o deflator implícito do PIB nacional. Foi utilizado o PIB Real, ou seja, desconsiderando os efeitos da inflação, pois tal indicador permite uma avaliação mais consistente da variação na produção dos bens, uma vez que desconsidera as variações dos seus preços de mercado.

5.5.1.9 Exportações

Os valores para exportação foram obtidos por meio de planilhas geradas no site do IPEADATA (BRASIL, 2019b) com dados do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior da Secretaria de Comércio Exterior. A unidade utilizada foi o dólar estadunidense.

Os dados de exportação encontrados são da modalidade *Free on Board* (FOB), o que significa que o exportador é responsável pela mercadoria só até ela estar dentro do meio de transporte que realizará o traslado, pronta para a viagem e liberado pela alfândega. Não foi possível encontrar dados correspondentes aos anos anteriores a 1997. Diante disso, foi realizada extrapolação exponencial, com base nas informações do IPEADATA.

5.5.1.10 Analfabetos

As informações de porcentagem da população analfabeta foram obtidas por meio da base de dados do IPEA (BRASIL, 2019b). O levantamento desse dado considera pessoas com 15 anos ou mais de idade que não sabem ler nem escrever um bilhete simples.

O IPEADATA não consta com informações para os anos de 1991, 1994, 2000, 2010 e de 2015 a 2018. Para preenchimento das lacunas a opção foi pela aplicação de média aritmética entre os anos imediatamente anteriores e posteriores aos anos de 1991, 1994, 2000 e 2010. Já para os períodos de 1998 a 1990 e 2015 a 2018, foram realizadas extrapolações lineares.

5.5.2 Banco de Dados

A Tabela 5.1 foi elaborada a partir dos dados coletados de fontes diversas, e como descrito anteriormente, nos casos de descontinuidade das séries históricas, dependendo do comportamento dos dados e natureza da variável. Assim, foram utilizados os recursos disponíveis no *software Excel*. As estimativas e projeções são confiáveis para a finalidade de uso, uma vez que elas foram geradas com base na análise do comportamento dos dados disponíveis.

Tabela 5.1 - Valores das variáveis no período de 1988 a 2018.

Ano	RR- Rede Rodoviária (Km)	RDC- Rede Rodoviária Clandestina (Km)	AD- Área Desmatada (Km²)	POP- População (unidade)	RDPC- Renda domiciliar per capita (R\$)	TD- Taxa de desemprego (%)	HOM- Homicídios (unidade)	PIB [R\$ de 2010 (mil)]	EXP- Exportação [US\$ FOB (mil)]	ANA- Analfabetos (%)
1988	32614,67	51518,33	126080,03	4790371	465,54	9,15	591	38816638	594097762	13,22
1989	32753,09	54135,19	131830,03	4888355	615,21	9,16	675	40340722	670174191	13,69
1990	32891,51	56884,98	136720,03	4988343	543,20	9,16	742	42349504	755992490	13,12
1991	33029,93	59774,44	140500,03	4950060	470,74	9,17	812	41446579	852800141	13,59
1992	33168,35	62810,67	144287,03	5328133	398,27	8,97	762	42866753	962004373	14,06
1993	33306,77	66001,13	148571,03	5212812	473,82	7,93	624	45877905	1085192612	13,80
1994	33445,19	69353,64	152855,03	5332187	496,68	8,19	716	45144977	1224155564	13,32
1995	33583,61	72876,44	160700,03	5448598	519,55	8,46	695	45159307	1380913238	12,83
1996	33767,35	76578,19	166835,03	5510849	483,24	9,16	688	45284173	1557744317	12,49
1997	33852,22	80467,96	170974,03	5650681	498,47	10,13	746	46622445	1697245568	13,12
1998	33991,22	84555,32	176803,03	5768476	507,60	9,18	769	47675171	1923891341	13,70
1999	34130,23	88850,29	181914,03	5886454	490,08	10,35	637	48539244	2062864070	12,48
2000	34269,24	93363,42	188585,03	6192307	491,73	10,41	806	50822027	2367282766	11,75
2001	34211,30	98105,80	193822,03	6341736	493,38	10,47	955	52599759	2220297231	11,01
2002	34211,10	103089,07	201332,03	6453683	514,06	10,77	1186	54513152	2211126862	10,55
2003	35178,10	109663,00	208477,03	6574993	430,54	10,18	1405	58018890	2609322504	10,50
2004	35161,60	114612,00	217347,03	6850181	449,39	8,70	1517	62215374	3666974361	14,52
2005	35161,60	119561,00	223246,03	6970586	445,11	9,70	1924	64818948	4584445153	13,32
2006	35161,60	124510,00	228905,03	7110465	479,50	9,26	2057	69415228	6528039362	13,22
2007	35154,00	129459,00	234431,03	7065573	526,27	8,72	2177	70970315	7829388034	12,59
2008	35144,30	136527,00	240038,03	7321493	542,79	6,78	2838	74477161	10322891007	12,41
2009	35144,30	146574,50	244319,03	7431020	533,29	10,24	2973	72074490	8313352544	12,73
2010	35689,90	156622,00	248089,03	7603239	566,37	9,93	3497	77847597	13618413985	11,67
2011	35690,80	184033,50	251097,03	7688593	599,44	9,62	3050	76612206	18237897376	10,61
2012	36011,30	211445,00	252838,03	7792561	612,63	7,80	3220	79054472	14764185875	10,51
2013	36011,30	222864,85	255184,03	7969654	627,35	9,59	3377	81574593	15898948627	10,05
2014	36014,50	245706,95	257071,03	8073924	676,49	9,71	3429	84175052	14232496719	9,97
2015	36655,80	270890,20	259224,03	8175113	571,06	9,06	3661	86858409	10201505071	10,86
2016	36668,20	298654,57	262216,03	8272724	575,46	9,33	4207	89627307	10393181740	10,75
2017	36673,60	329264,59	264649,03	8366628	579,90	9,34	4550	92484472	14330397918	10,64
2018	36673,60	363011,92	267393,03	8513497	584,37	9,35	4817	95432719	15697777925	10,53

5.6 Algoritmo *Random Forest*

O algoritmo *Random Forest* é originado da teoria do aprendizado de máquinas e notado por sua aplicação para reconhecimento de padrões, comumente utilizado para classificação e regressão supervisionada de dados (LOUPPE, 2014). Nesse estudo foram utilizados três algoritmos, sendo o *Random Forest* o que apresentou melhor desempenho para a predição da área desmatada com base nos dados de infraestrutura, ambientais e socioeconômicos do estado do Pará, no período de 1988 a 2018.

O diagrama de blocos da Figura 5.4 apresenta as etapas do algoritmo *Random Forest*. Primeiramente, os dados de treinamento são organizados numa matriz, em seguida é atribuído o conjunto de parâmetros para o *Gridsearch*. Na etapa posterior é realizada uma seleção de amostras, extraídas aleatoriamente dos dados originais de

treinamento, e o recurso utilizado para repartição dos dados foi o *Leave-On-Out*. Por fim, é plotado o erro médio absoluto (MAE) e o gráfico de importância das variáveis.

A medida de impureza difere de árvores de classificação e regressão. Nesse estudo a medida de impureza é dada através do erro quadrático médio (MSE) e o erro médio absoluto (MAE), por se tratar de um problema de regressão.

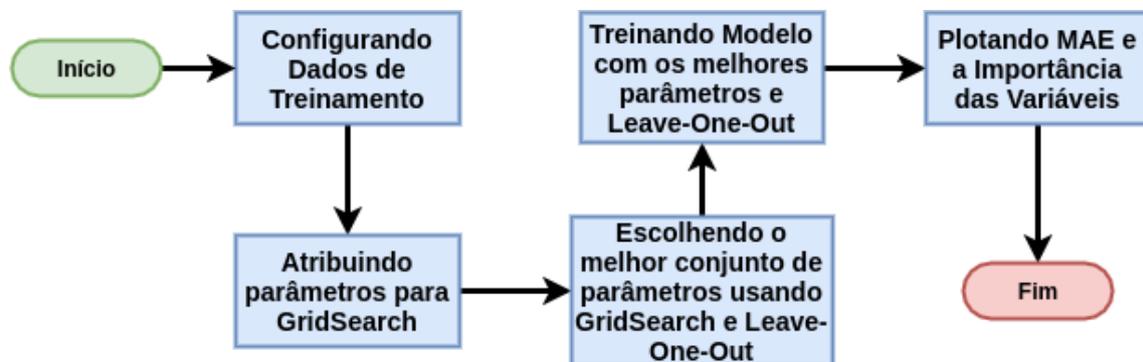


Figura 5.4 - Etapas do algoritmo *Random Forest*.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Coeficientes de Correlação das Variáveis

A partir dos dados levantados foi calculada a matriz de correlação de Pearson e de Spearman das variáveis, método estatístico para obtenção do grau de correlação linear entre pares de variáveis de um conjunto de dados. A Figura 6.1 apresenta a matriz dos coeficientes de correlação de Pearson das variáveis analisadas. As variáveis estão representadas da seguinte forma: RR - rede rodoviária, RDC - rede rodoviária clandestina, AD - área desmatada, POP - população, RDPC - renda domiciliar per capita, TD - taxa de desemprego, HOM - homicídios, PIB - produto interno bruto, EXP - exportação e ANA - índice de analfabetos.

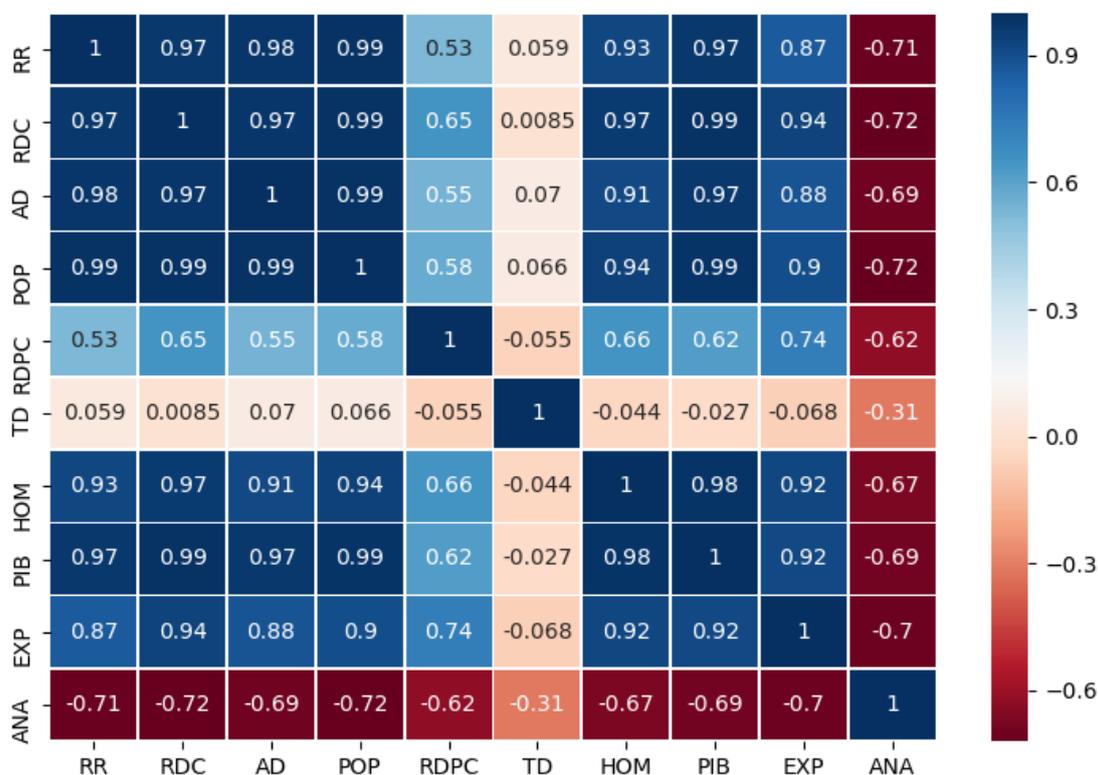


Figura 6.1 - Matriz de correlação de Pearson.

A Figura 6.1 representa a plotagem da matriz de correlação, criada a partir da rotina de execução da análise de correlação de Pearson entre os pares de variáveis, e a Figura 6.2 mostra a coeficientes de correlação de Spearman das variáveis.

	RR	RDC	AD	POP	RDPC	TD	HOM	PIB	EXP
RDC	0,977								
AD	0,977	1							
POP	0,977	0,999	0,999						
RDPC	0,489	0,571	0,571	0,571					
TD	0,236	0,214	0,214	0,219	0,022				
HOM	0,921	0,945	0,945	0,946	0,563	0,175			
PIB	0,974	0,996	0,996	0,995	0,568	0,199	0,939		
EXP	0,945	0,967	0,967	0,965	0,584	0,213	0,908	0,962	
ANA	-0,711	-0,712	-0,712	-0,711	-0,591	-0,423	-0,636	-0,702	-0,721

Figura 6.2 – Matriz de correlação de Spearman.

As matrizes apresentam semelhanças no que se refere à correlação com a área desmatada. Comparando os coeficientes das matrizes (Figuras 6.1 e 6.2) nota-se que as variáveis relacionadas à infraestrutura rodoviária (RR e RDC) têm uma forte correlação com a área desmatada (AD), seguido da população e PIB. Em ambas, o índice de analfabetos apresentou correlação negativa com as demais variáveis.

6.2 Previsão da Área Desmatada, Erro Médio Absoluto e Desvio Padrão

A linguagem computacional empregada foi *Python 3.7* e o recurso computacional utilizado foi a *scikit-learn*, uma biblioteca de *machine learning open-source* distribuída sob a licença BSD para a linguagem de programação *Python*. A biblioteca inclui vários algoritmos de aprendizado supervisionado e não supervisionado utilizados para tarefas de classificação, regressão e agrupamento, sendo uma das mais utilizadas no campo da inteligência artificial.

O método de análise da classificação e regressão de algoritmos de aprendizado de máquina utilizado foi o *cross-validation*, que consiste basicamente em particionar o conjunto de dados em amostras que serão utilizadas para treinamento e teste do modelo, de forma a alternar as partições que serão utilizadas para cada etapa de ajuste do algoritmo.

Há três maneiras de repartir o conjunto de dados utilizando *cross-validation*, são estes: *Hold-Out*, *K-Fold* e *Leave-One-Out*. Logo, cada uma delas possui aplicação dependente do tamanho do conjunto de dados. Neste trabalho foi utilizado o método *Leave-One-Out* devido ao tamanho reduzido de amostras do *dataset*, ou seja, 310 dados (Tabela 5.1). O método *Leave-One-Out* é utilizado para prever o valor de uma amostra com base no treinamento daquele modelo com base em todas as amostras

anteriores. Por exemplo, a primeira amostra, referente ao ano de 1988, será separada do conjunto de dados. Em seguida, um modelo será treinado utilizando todas as demais amostras. Após o treino a amostra separada será alimentada no modelo treinado e sua saída será comparada a saída dele. Por fim, o mesmo deve ser feito com os demais dados de forma sequencial.

Portanto, pode-se extrair a curva de tendência que um modelo treinado com aquele conjunto de amostras irá seguir, sendo possível definir o erro médio absoluto (MAE) e desvio padrão (STD), de forma a prever novos valores de entrada do domínio em que o modelo foi treinado.

6.2.1 Modelo *Decision Trees*

A curva do desmatamento ao longo do tempo e a estimativa de área desmatada pelo modelo *Decision Trees* está mostrada na Figura 6.3. Esse algoritmo apresentou um desempenho razoável, e quando comparado aos outros modelos, ficou numa situação intermediária, como pode ser observado na curva, os valores previstos tendem a se aproximar dos valores reais.

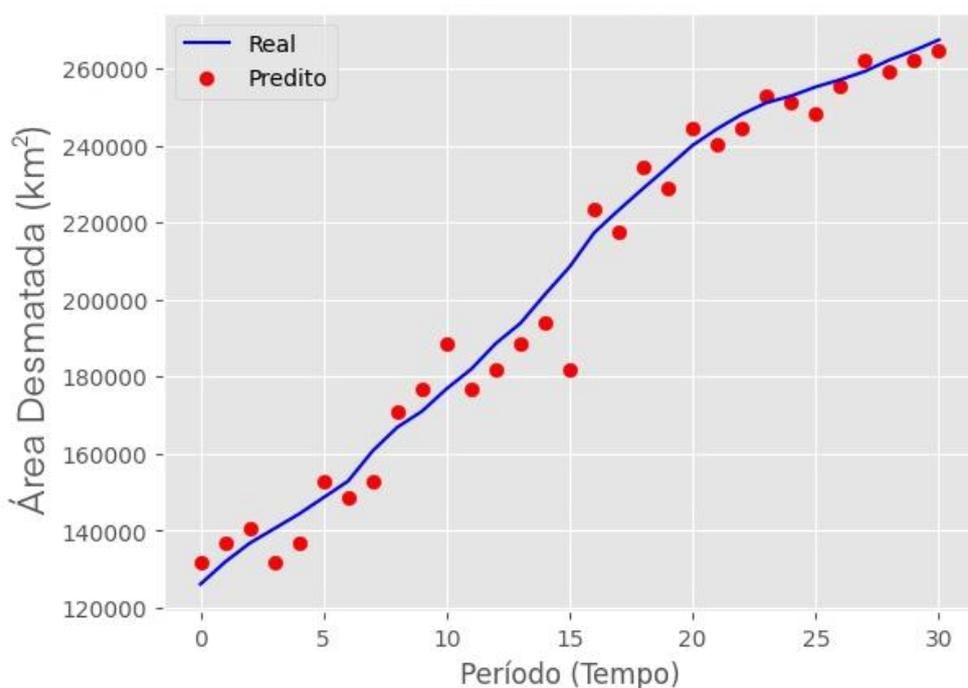


Figura 6.3 - Modelo *Decision Trees* da área desmatada.

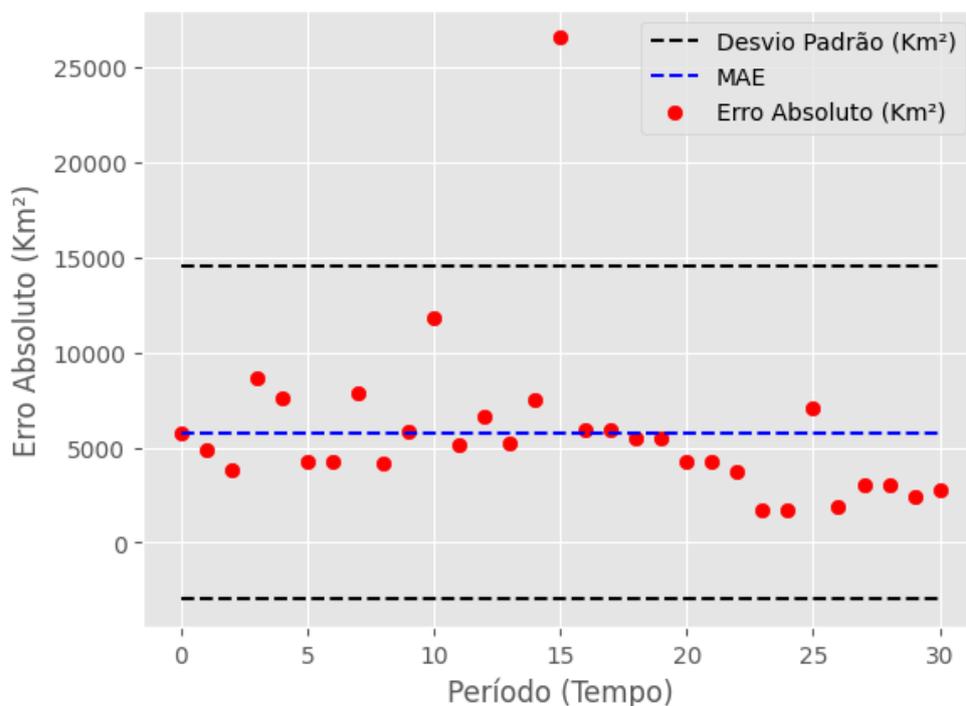


Figura 6.4 - Erro absoluto do modelo *Decision Trees* entre áreas desmatadas real e prevista.

A Figura 6.4 demonstra o quão distante o valor real pode ficar do previsto pelo modelo; assim, o intervalo de desvio padrão deve ser o menor possível. Os valores exatos são dados em unidades de área. Desse modo, os resultados foram os seguintes: erro médio absoluto, MAE = 5.747,10 km² e desvio padrão, STD = 4.391,40 km².

6.2.2 Modelo *K-Nearest Neighbor*

Dos três modelos testados, o *K-Nearest Neighbor* foi o que apresentou pior desempenho. A Figura 6.5 apresenta a curva de desmatamento e mostra os valores estimados pelo modelo. As primeiras amostras, correspondentes ao período de 1988 a 2002, apresentaram um bom resultado com os valores estimados próximos aos reais, mas nas décadas seguintes foi a curva que apresentou maior dispersão.

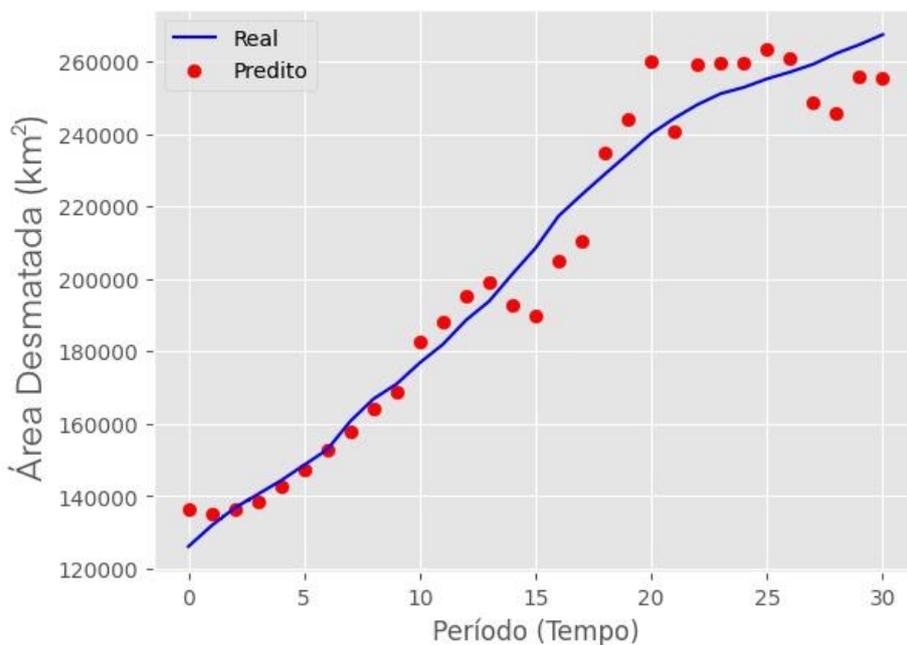


Figura 6.5 - Modelo *K-Nearest Neighbor* da área desmatada.

Este modelo apresentou os maiores valores de erro médio absoluto (MAE) e desvio padrão (STD) dos algoritmos analisados. A Figura 6.6 mostra o erro absoluto entre a área desmatada real e a área desmatada prevista. Os resultados foram os seguintes: erro médio absoluto, $MAE = 7.379,12 \text{ km}^2$ e desvio padrão, $STD = 5.119,92 \text{ km}^2$.

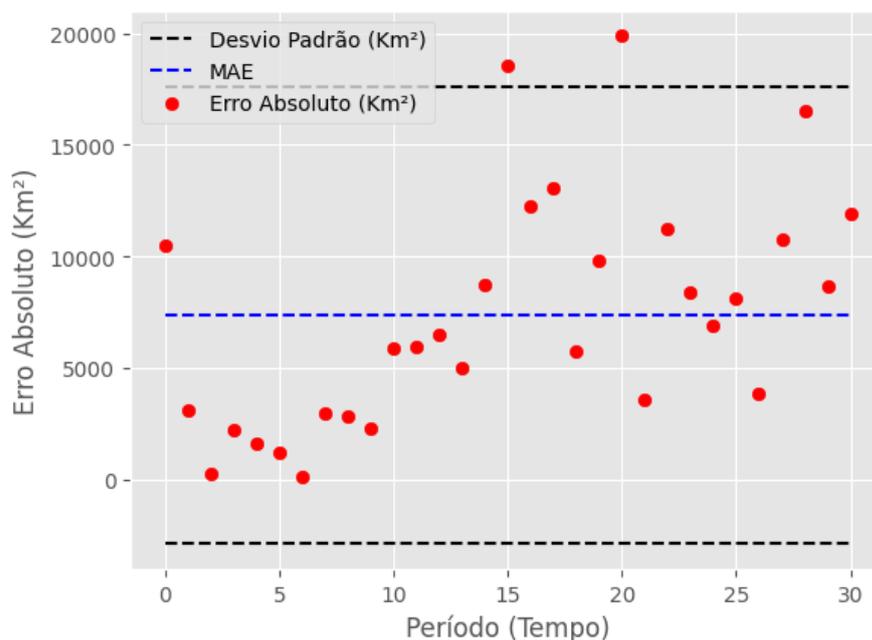


Figura 6.6 - Erro absoluto do modelo *K-Nearest Neighbor* entre áreas desmatadas real e prevista.

6.2.3 Modelo *Random Forest*

O modelo *Random Forest* superou a performance dos modelos *Decision Trees* e *K-Nearest Neighbor*, apresentando o melhor desempenho no que se refere aos parâmetros avaliados, com um erro médio absoluto MAE = 2.425,30 km² e desvio médio padrão STD = 2.345,33 km². Pelo resultado comparativo apresentado, foi o algoritmo selecionado para realização das próximas etapas desse estudo, ou seja, análise do percentual de importância das variáveis, projeção da curva para previsões de desmatamento nos próximos anos e análise de sensibilidade para estimativas de desmatamento a partir da expansão da rede viária. A Figura 6.7 mostra a curva do desmatamento e a Tabela 6.1 apresenta o resultado do erro médio absoluto e desvio médio padrão dos três modelos avaliados.

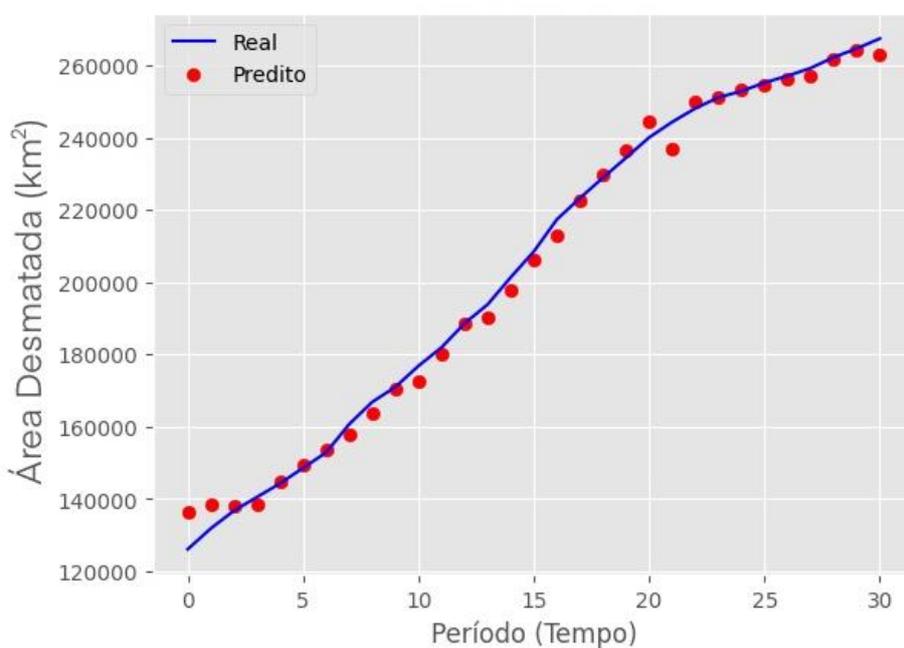


Figura 6.7 - Modelo *Random Forest* da área desmatada.

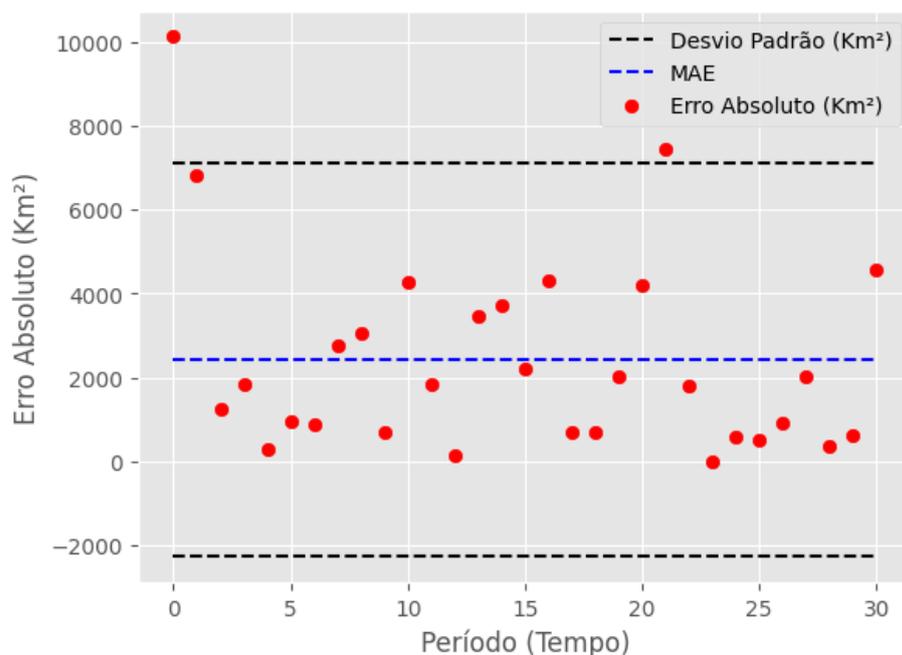


Figura 6.8 - Erro absoluto do modelo *Random Forest* entre áreas desmatadas real e prevista.

A Tabela 6.1 apresenta os valores do erro médio absoluto e desvio padrão dos modelos *Decision Trees*, *K-Nearest Neighbor* e *Random Forest*.

Tabela 6.1 - Comparativo entre os modelos avaliados.

Modelos de Regressão	Erro Médio Absoluto (MAE) (km ²)	Desvio Padrão (STD) (km ²)
<i>Decision Trees</i>	5.747,10	4.391,40
<i>K-Nearest Neighbor</i>	7.379,12	5.119,92
<i>Random Forest</i>	2.425,30	2.345,33

6.3 Percentual de Importância das Variáveis

O percentual de importância das variáveis analisadas para a predição da área desmatada foi calculado a partir dos resultados do algoritmo *Random Forest* (Figura 6.9). A rede rodoviária clandestina (RDC) é a variável que apresentou maior importância na área desmatada e a rede rodoviária (RR) está na segunda posição, o que indica uma forte relação de causalidade com a área desmatada e a influência da rede de transporte rodoviário no processo de devastação da floresta. Comparando esse resultado com as

correlações dos coeficientes de Pearson (Figura 6.1) e de Spearman (Figura 6.2), nota-se semelhança nos resultados, uma vez que as redes rodoviária e clandestina foram variáveis que apresentaram fortes índices de correlação, como também o PIB e a população. Logo, as quatro variáveis que apresentaram maiores correlações coincidem com as quatro variáveis com os maiores índices de importância de atributos, embora não estejam na mesma ordem. Os resultados validam estudos anteriormente citados que apontam a influência da infraestrutura rodoviária, população e PIB como fatores responsáveis pelo desmatamento.

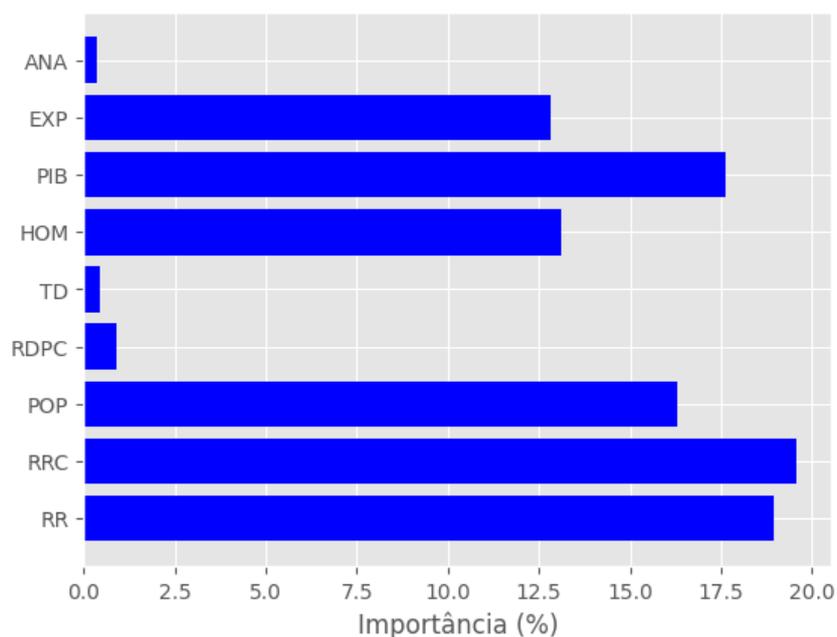


Figura 6.9 - Percentual de importância das variáveis de previsão da área desmatada.

6.4 Estimativa de Área Desmatada até 2050

A partir da curva obtida por meio do algoritmo *Random Forest*, o gráfico da função foi plotado para estimativa de valores até o ano de 2050 (Figura 6.10), ressaltando que, caso as condições econômicas, sociais, legais e de gestão sejam mantidas, pode-se estimar os valores de área devastada para o estado do Pará nos próximos anos.

O método *Random Forest* teve um bom desempenho na precisão do relacionamento entre as variáveis e a área desmatada, embora não realize extrapolações, isto é, não procede ou permite inferências aquém ou além dos limites dos valores ou atributos dos dados utilizados para o construir. Diante disso, para realizar as projeções futuras, foi realizada análise de regressão, pelo método dos mínimos quadrados (melhor ajuste), com a série histórica de 30 anos, identificando a equação e

sua respectiva curva que modela a tendência dos valores do desmatamento em função da evolução de todas as variáveis, como no cenário modelado (1988-2018). Este modelo de projeção, não é o da IA, melhor dizendo, a equação de tendência foi definida como aquela que apresentasse o maior Coeficiente de Determinação (R^2), isto é, a maior capacidade de explicação. Assim, foi definida a parábola (Equação 7).

$$y = -40.47x^2 + 167133.29x - 172206045.70 \quad (7)$$

Onde:

X = Ano (2020, 2030, 2040 e 2050) e

Y = Área desmatada, em km^2

A Equação 7 foi utilizada para realizar a projeção da tendência dos valores de desmatamento nos próximos 30 anos, observando o cenário de referência adotado, apresentando coeficiente de determinação forte, de 0,9783, significando que 97,83% da variação ou evolução do desmatamento futuro é explicado pela curva (Figura 6.10).

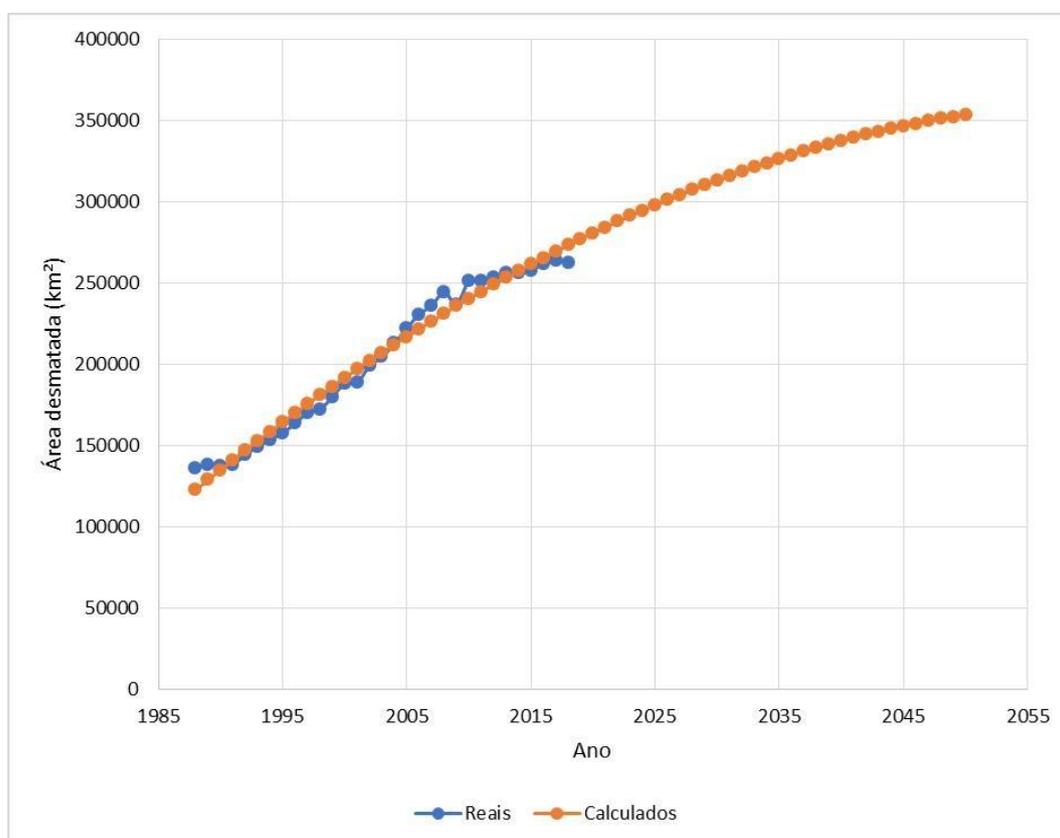


Figura 6.10 - Modelagem e estimativa da área desmatada no estado do Pará até 2050.

A Figura 6.11 mostra a previsão de desmatamento no estado do Pará, numa série temporal até 2050 utilizando o modelo de Holt-Winters Aditivo. Esse método

adiciona o fator de sazonalidade à previsão de tendência, leva em conta a tendência dos valores e a sazonalidade da série temporal. Como não foi identificada sazonalidade que influencie os valores da série e os dados não demonstram periodicidade foi realizado a previsão para quatro valores de sazonalidade (Figura 6.11).

Os períodos de sazonalidade considerados foram: zero, dez, quinze e vinte anos. A curva de sazonalidade de 15 anos apresentou semelhança com a curva de regressão dos mínimos quadrados até o ano de 2035. A curva sem sazonalidade foi a que apresentou os resultados mais agressivos e a curva de sazonalidade de 20 anos foi a que apresentou melhor resultado no que se refere à redução das taxas de desmatamento (Figura 6.11).

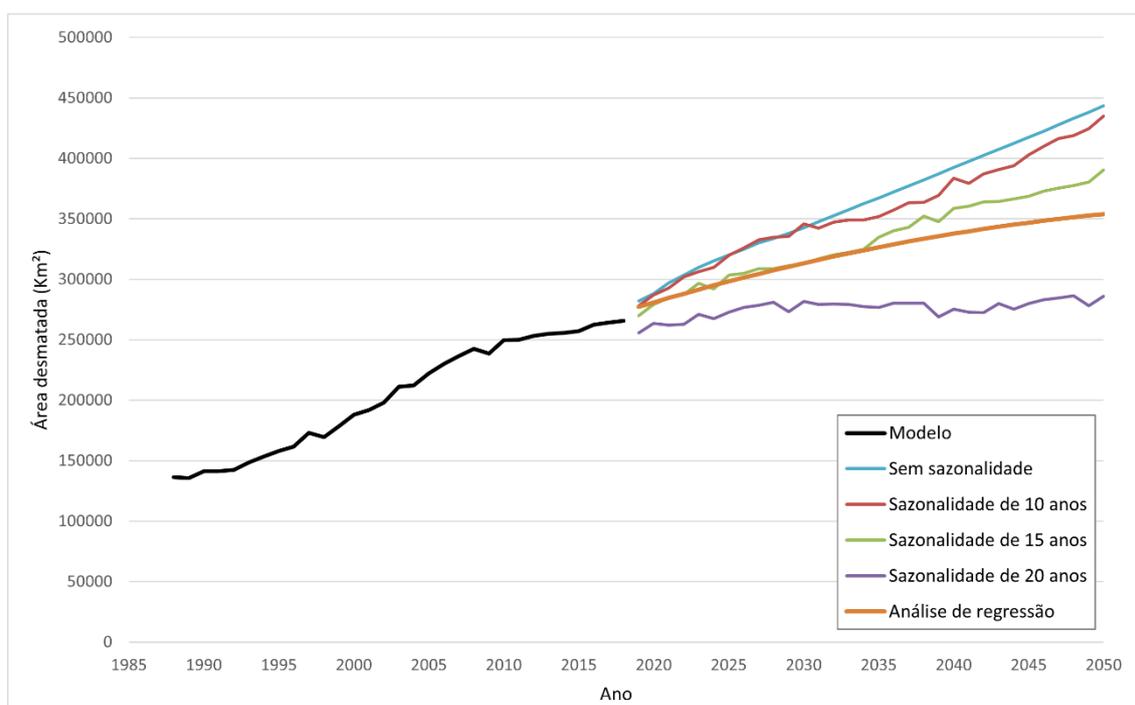


Figura 6.11 – Modelagem e estimativa da área desmatada no estado do Pará até 2050 baseado no modelo de Holt-Winters.

A Tabela 6.2 mostra a previsão decenal do território que pode ser desmatado no estado do Pará até o ano de 2050, pelo método dos mínimos quadrados, com os valores dos crescimentos absolutos e relativos, que corroboram com os resultados da Figura 2.6, que mostra as maiores taxas de desmatamento na década de 2000 e um acentuado declínio na década de 2010, em relação à década anterior, ou seja, a redução relativa do crescimento em torno de 65%. A Tabela 6.3 sintetiza os resultados da Tabela 6.2, exibindo a representatividade percentual da área desmatada considerando os territórios da Amazônia Legal e Pan-Amazônia. Os números são muito expressivos, mesmo

quando relativizados à área total dessas unidades territoriais, visto que nem tudo na Amazônia é, na sua forma natural, floresta, pois existem áreas de savana e outros biomas menores.

Tabela 6.2 - Estimativa da área desmatada no estado do Pará.

Ano	Área Desmatada (km ²)	Crescimento Absoluto (km ²)	Crescimento Relativo	Redução Relativa do Crescimento
2000	188.441,73			
2010	251.354,52	62.912,78	33,39%	
2020	280.979,90	29.625,38	11,79%	65%
2030	313.392,65	32.412,75	11,54%	2%
2040	337.711,96	24.319,31	7,76%	33%
2050	353.397,83	15.685,87	4,64%	40%
2020 a 2050		72.417,93	25,77%	

Tabela 6.3 - Previsão percentual de território a ser desmatado.

Período	Área Desmatada (km ²)	Relação com o território (%)		
		Estado do Pará	Amazônia Legal	Pan-Amazônia
Até 2020	280.979,90	22,52	5,95	4,02
Até 2050	353.397,83	28,32	7,49	5,06

A área desmatada acumulada foi obtida a partir da Equação 7 e da Tabela 6.3, que mostra o percentual desmatado da floresta considerando os territórios do estado do Pará, Amazônia Legal e Pan-Amazônia. Em 2020, no Pará, houve um aumento em relação a 2019 da ordem de 17,4%, manteve a posição de estado mais agredido, com 45,5% de todo o desmatamento registrado na Amazônia Legal em 2020 (IMAZON, 2021). A estimativa é produzida pelo INPE, que analisa um conjunto de 229 cenas do sensor *OLI/Landsat-8* que recobrem a Amazônia Legal (IMAZON, 2021; INPE, 2021). Assim, a área total desmatada até o ano de 2020 é de 276.464 km², o que equivale a um erro de 4.515,9 km² e 1,63% do valor estimado pela análise de regressão realizada do modelo *Random Forest*. A Tabela 6.4 apresenta os erros previstos pelo modelo Holt-Winters e a sazonalidade de 15 anos apresentou um erro de 1,04%, o menor valor de todas as avaliações.

Tabela 6.4 – Erros de previsão do modelo Holt-Winters considerando o ano de 2020.

	Sazonalidade (anos)			
	zero	10	15	20
Previsão 2020	288.040,3	287.124,3	279.336,3	263.477,8
Erro (%)	4,52	3,85	1,04	4,70

Tabela 6.5 – Estimativa de desmatamento considerando critérios variados.

Critério Avaliado	Ano - Desmatamento previsto (km ²)		
	2030	2040	2050
Sem sazonalidade	342.727,20	392.357,91	443.317,44
Sazonalidade 10 anos	345.929,74	383.519,45	434.814,27
Sazonalidade 15 anos	313.047,93	358.786,70	390.446,20
Sazonalidade 20 anos	281.578,64	275.423,20	285.875,39
Análise de regressão	313.392,65	337.711,96	353.397,83

Considerando os critérios para estimativa de desmatamento utilizados no estudo, temos uma previsão de desmatamento para o ano de 2030 entre 281.578,64 km² e 345.929,74 km², para o ano de 2040 entre 275.423,20 e 392.357,91 km² e para o ano de 2050 um intervalo entre 285.875,39 km² e 443.317,44 km². Valores esses inaceitáveis para sustentabilidade do planeta e incompatíveis com os compromissos assumidos pelo governo brasileiro na Conferência do Clima, COP 26, que trata de redução de 50% das emissões dos gases associados ao efeito estufa até 2030 e da neutralização das emissões de carbono até 2050. De acordo com SEEG (2021), o principal motivo do aumento das emissões no Brasil foi o desmatamento da Amazônia, e o estudo mostra que, sem medidas efetivas para o seu combate não será possível a redução das emissões no Brasil.



Figura 6.12 – Estrada clandestina. Registro realizado em operação contra o desmatamento em 13/08/2019.

Fonte: Agência Pará de Notícias (2021).

6.5 Previsão de Desmatamento na Região da Calha Norte

Para as estimativas de desmatamento na região da Calha Norte, que é desprovida de rodovias, o recurso utilizado nessa etapa foi análise de sensibilidade, que permitiu, por meio de inferências realizadas no modelo *Random Forest* construído, elaborar uma análise de cenários para estimar, prever ou predizer a área desmatada caso sejam implementadas as rodovias previstas e outras a serem planejadas futuramente.

A região definida para análise foi a Calha Norte, que está situada na mesorregião do Baixo Amazonas, por ser a área mais preservada em termos de cobertura florestal do estado do Pará. Localizada ao norte do rio Amazonas, abriga nove municípios e, com relação à infraestrutura rodoviária, está previsto para esta região o prolongamento das rodovias federais BR-163 e a BR-210, ambas iniciadas na década de 1970.

Para a Calha Norte paraense está previsto o prolongamento da BR-163 até a fronteira com o Suriname, obra anunciada recentemente pelo Governo Federal como parte do Projeto Rio Branco e a retomada da BR-210, conhecida como Perimetral Norte.

6.5.1 Análise de Sensibilidade

Uma Análise de Sensibilidade (AS) parcial (um-por-vez) (HOCHARD *et al.*, 2010) foi realizada para avaliar, de acordo com o modelo *Random Forest* utilizado,

quanto ao efeito direto as variações de rede rodoviária clandestina e rede rodoviária tiveram períodos distintos considerados. Mesmo que esse não seja o propósito original da AS, a técnica foi utilizada para apresentar melhor os efeitos das variáveis. Assim, inferências foram realizadas em todos os anos da série histórica, excluindo os valores que extrapolavam os limites numéricos das variáveis originais, tendo em vista que o modelo *Random Forest* não opera com extrapolações. Assim, a modelagem de IA foi realizada para evitar comprometer a análise com uma limitação baseada em um único ano ou sobre a magnitude de uma única variável, a fim de considerar a provável não linearidade de causa e efeito entre as variáveis (PIANOSI *et al.*, 2016). Consideramos também percentuais diferenciados, respeitando a amplitude das variáveis RN e RDC. Dessa forma, os anos utilizados para esta análise foram variados, sempre desconsiderando as amostras que não pertenciam ao intervalo entre os extremos do conjunto de dados.

Conforme a análise incremental determinística (DOUGLAS-SMITH *et al.*, 2020; FERRETTI; SALTELLI; TARANTOLA, 2016; MOHANTY; CODELL, 2002) foi alterado os valores de entrada de CRN em $\pm 10\%$ e $\pm 20\%$ e de RN em $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$; posteriormente foi calculado o efeito sobre a área desmatada prevista pelo modelo *Random Forest*. As variações percentuais adotadas respeitaram a amplitude das variáveis.

As Tabelas 6.6 e 6.7 apresentam uma amostra de como foi obtido o efeito médio, ou seja, exibem apenas o cálculo do efeito considerando os anos 1991, 1992 e 1993, para uma variação de 10% da rede rodoviária clandestina (Tabela 6.6) e a Tabela 6.7 apresenta parte de uma das planilhas da rede rodoviária, com intuito de compreensão do cálculo do efeito. O efeito médio utilizado para previsão de desmatamento considerou os outros anos da série histórica e outras variações percentuais conforme esclarecido anteriormente. Mediante a extensão e quantidade de planilhas, a opção foi apresentar apenas uma parte das planilhas em forma de Tabelas.

Tabela 6.6 – Representação do cálculo do efeito da área desmatada com a variação da rede rodoviária clandestina considerando uma variação de 10%

Ano	Porcentagem	RDC (km)	Real AD (km ²)	Estimada AD (km ²)	RDC Variação	AD Variação	Efeito (km ² /km)
1991	90%	53.796,99	-	137.880,0	5.977,44	2.620	0,438
	100%	59.774,44	140.500	138.644,3	-	-	-
	110%	65.751,88	-	139.663,2	5.977,44	836,78	0,140
1992	90%	56.529,60	-	142.811,4	6.281,07	1.475,59	0,235
	100%	62.810,67	144.287	144.582,2	-	-	-

	110%	69.091,74	-	145.541,3	6.281,07	1.254,29	0,200
	90%	59.401,01	-	148.112,6	6.600,11	458,47	0,069
1993	100%	66.001,13	148.571	149.544,6	-	-	-
	110%	72.601,24	-	151.861,1	6.600,11	3.290,12	0,498

Tabela 6.7 – Representação do cálculo do efeito da área desmatada com a variação da rede rodoviária considerando uma variação de 5%

Ano	Porcentagem	RR (km)	Real AD (km ²)	Estimado AD (km ²)	RR Variação	AD Variação	Efeito (km ² /km)
1991	95%	31.378,44	-	-	1.651,50	-	-
	100%	33.029,93	140.500	141.228,10	-	-	-
	105%	34.681,43	-	151.841,80	1.651,50	11.341,82	6,868
1992	95%	31.509,94	-	-	1.658,42	-	-
	100%	33.168,35	144.287	142.398,50	-	-	-
	105%	34.826,77	-	160.534,10	1.658,42	3.000,77	9,797
1993	95%	31.641,43	-	-	1.655,34	-	-
	100%	33.306,77	148.571	148.382,50	-	-	-
	105%	40.335,02	-	157.717,00	1.655,34	9.145,97	5,491

A Tabela 6.8 mostra os resultados do efeito médio das análises de sensibilidade considerando as variações percentuais adotadas de 5%, 10% e 20%. Na análise de sensibilidade as demais variáveis de entrada do modelo foram mantidas, ficando inalteradas. Os resultados obtidos demonstram que para cada 1 km de rede rodoviária o efeito médio na área desmatada fica no intervalo de 4,913 km² a 5,695 km², considerando uma variação percentual de 5% e 10%, respectivamente. Os demais índices podem ser averiguados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Valores do efeito médio das análises de sensibilidade.

Variável	Efeito Médio (km ² /km)		
	5%	10%	20%
Rede Rodoviária (RR)	4,913	5,695	-
Rede Rodoviária Clandestina (RDC)	-	0,219	0,171

Como ilustração foi considerada a largura das vias da rede rodoviária de 10 m e da rede rodoviária clandestina 4 m. Para a rede rodoviária, foi adotado o valor da rodovia simples (DNER, 1999), pelo fato de ser o tipo de rodovia mais comum no estado

do Pará. Para as estradas clandestinas, devido à ausência de dados dessa natureza, adotou-se o valor de largura de 4 m. Assim, cada quilômetro da rede rodoviária corresponde a uma superfície de 0,01 km² e 0,004 km² para as estradas clandestinas. Dessa forma, a partir dos índices de efeito médio encontrados, tem-se que 1 km de rodovia regulamentada incrementa de 491,3 km² a 569,5 km² de desmatamento e 1 km de estrada clandestina corresponde ao valor de 42,75 km² a 54,75 km² de desmatamento. Esses resultados apontam que a rodovia oficial impacta a floresta muito mais que a estrada clandestina em termos de extensão da rodovia. É importante considerar que a rede rodoviária clandestina, com o decorrer do tempo, se torna muito mais extensa que a rede oficial. A Figura 6.13 mostra o efeito dessas variáveis no desmatamento em unidade de área.

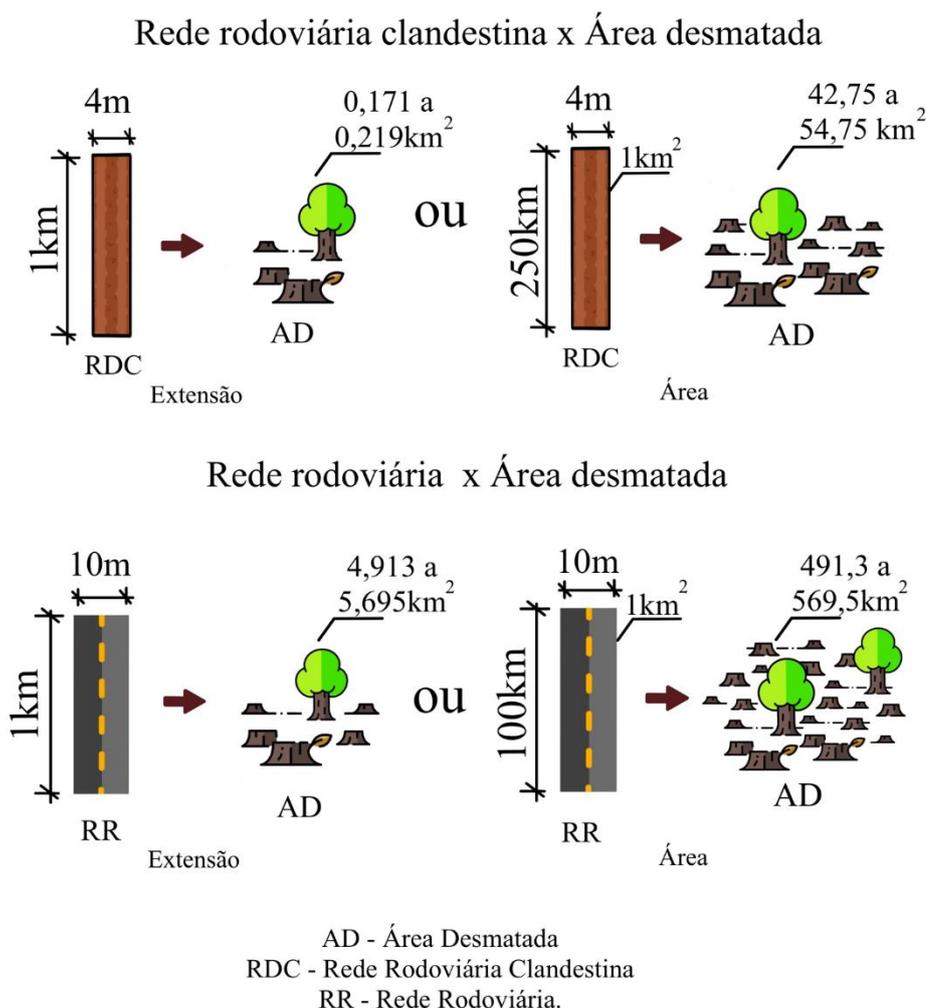


Figura 6.13 - Efeito da rede rodoviária e rede rodoviária clandestina na área desmatada.

6.5.2 Estimativa da Área Desmatada Considerando o Efeito Médio

Para o cálculo de previsão de desmatamento provocado pela implantação do projeto de prolongamento das rodovias federais BR-210 e BR-163, atualmente em fase de planejamento, foi considerada a extensão prevista para as rodovias e os efeitos médios de desmatamento mostrados na Tabela 6.8. Em consulta formal ao DNIT, registrado por meio de correio eletrônico, foi informado que não existe Estudo de Viabilidade Técnica Econômica e Ambiental (EVTEA) para os trechos das rodovias em razão das fortes restrições ambientais no trecho. Segundo os arquivos *Shapefile* do DNIT utilizados para elaboração de mapas disponíveis em (BRASIL, 2019c), a extensão constatada da BR-210 em implantação é de 399 km e para a BR-163, na mesma situação, ou seja, com a extensão do trecho planejado na Calha Norte, é de 437 km. A Tabela 6.9 mostra os intervalos de previsão de desmatamento considerando os efeitos da análise de sensibilidade, isto é, 4,913 e 5,695 para os percentuais de 5% e 10% respectivamente. Portanto, pode-se afirmar que a implantação das rodovias BR-163 e BR-210 na Calha Norte podem promover um desmatamento de 4.107,3 km² a 4.761 km². Essa previsão desconsidera o efeito da malha clandestina.

Tabela 6.9 – Previsão de desmatamento devido à rede rodoviária.

Rodovia	Extensão (km)	Desmatamento previsto (km ²)	
		5%	10%
BR-163	437,0	2.147,0	2.488,7
BR-210	399,0	1.960,3	2.272,3
Total	836,0	4.107,3	4.761,0

A rede clandestina normalmente surge após a implantação de rodovias, expandindo-se ao longo do tempo e, conforme verificado na série histórica do estudo, teve um crescimento bem maior quando comparada com a rede oficial. Os investimentos na rede rodoviária federal e estadual normalmente são em manutenção de rodovias, construção de pontes de concreto, duplicação de pistas, sinalização e melhoramentos de um modo geral. Os aspectos relacionados ao incremento do desmatamento decorrente de melhorias implementadas na infraestrutura viária existente não foram considerados no modelo, embora Orrico Filho (2005) afirme que as melhorias realizadas nas rodovias incrementam o desmatamento uma vez que reduzem o custo do transporte.

Para o cálculo do efeito da rede clandestina no desmatamento da Calha Norte, considerou-se a relação existente entre rede rodoviária e rede clandestina no ano de

2018, o equivalente a 9,91 vezes superior. Vale ressaltar que essa relação é o resultado de décadas após a construção das rodovias. No período em que foi realizado o levantamento da rede clandestina no estado do Pará, ou seja, entre os anos de 2003 a 2012, essa relação variou de 3,11 a 5,87 com uma média de 4,17. Considerando a extensão da rede rodoviária de 836 km e adotando a relação do ano de 2018 (9,91) vamos ter a extensão da rede clandestina, em longo prazo, o equivalente a 8.248,76 km e, considerando a relação de 4,17 a extensão da rede clandestina alcança o valor de 3.486,12 km (Tabela 6.10).

Tabela 6.10 – Previsão de desmatamento devido a rede rodoviária clandestina.

Extensão da rede clandestina (km)	Desmatamento previsto (km ²)	
	10%	20%
8.248,76	1.806,48	1.416,69
3.486,12	763,46	596,13

Dessa forma, pode-se considerar que num cenário mais otimista o desmatamento na Calha Norte, provocado pela implantação das BR-163 e BR-210 seria de 4.107,3 km² provocado pela rede rodoviária mais 596,13 km² promovido pela rede clandestina, ou seja, 4.703,43 km². Para um cenário mais pessimista seria o equivalente a 4.761,0 km² promovido pela rede rodoviária e 1.806,48 em decorrência da rede clandestina, num total de 6.567,48 km² (Tabela 6.11)

Tabela 6.11 – Cenários de desmatamento considerando as rodovias BR-163 e BR-210.

	Cenários de desmatamento (km ²)	
	Otimista	Pessimista
Rede rodoviária	4.107,3	4.761,0
Rede rodoviária clandestina	596,13	1.806,48
Total	4.703,43	6.567,48

6.6 Considerações Finais

A análise considerou que o padrão de desmatamento na Calha Norte será o mesmo realizado no estado do Pará no período de 1988 a 2018. O estudo de previsão de desmatamento desconsiderou aspectos relacionados à governança e políticas públicas que assegurem o cumprimento dos compromissos assumidos pelo governo federal, recentemente, na COP 26. O estudo serve de alerta sobre o potencial de área a ser desmatada caso as rodovias sejam implementadas e as práticas de relaxamento e descaso ao desmatamento sejam mantidas.

As rodovias federais e estaduais começaram a ser implementadas no início da década de 1970, as medições de desmatamento somente a partir de 1988 e os levantamentos de extensão das estradas clandestinas mais recentemente, a partir de 2003. A insuficiência de dados e séries históricas compromete a realização de estudos mais contundentes. Embora o modelo desenvolvido identifique e caracterize quantitativamente o desmatamento causado pela implantação de rodovias, oficiais e clandestinas, não apropria ou identifica o período de tempo que atinge a área desmatada prevista, ou ainda, como a perda de floresta se comporta ao longo do tempo.

A divulgação das obras de pavimentação da BR-163 provocou a aceleração do desmatamento e a exploração ilegal de madeira (FEARNSIDE, 2005). Situação semelhante ocorreu na Calha Norte quando houve o anúncio do projeto Barão do Rio Branco, começando uma especulação com relação ao traçado da rodovia e áreas adjacentes (RAHAL, 2021). Provavelmente, o processo de desmatamento após a implantação das rodovias deve ser mais acelerado ao que ocorreu com a implantação das rodovias na década de 1970. Atualmente, temos uma cultura de desmatamento, tecnologias mais avançadas e organização constituída para ele.

No campo da fiscalização e controle, é importante aperfeiçoar o monitoramento do surgimento e uso das estradas clandestinas em tempo real, de forma a inibir a ampliação da rede, impedindo assim a expansão de infraestrutura para desmatamento e degradação da floresta.

7 CONCLUSÕES

Constata-se que a rede rodoviária, oficial e clandestina, tem uma influência muito significativa no processo de desmatamento da floresta no estado do Pará, atualmente o mais desmatado de toda a Amazônia. A ingerência da rede rodoviária no processo de desmatamento foi comprovada por meio das correlações de Pearson e Spearman, e ratificada na análise do percentual de importância das variáveis analisadas no modelo *Random Forest*, mostrando assim a relevância do entendimento e compreensão da extensão e das características da rede rodoviária clandestina na Amazônia como um todo, inclusive para subsidiar a elaboração de políticas e definição de ações de combate ao desmatamento ilegal.

O estudo analisou o comportamento de variáveis socioeconômicas no período de 1988 a 2018 como forma de contribuir para a demonstração da influência da rede de transporte rodoviário no processo de desmatamento do estado do Pará, constatando que os coeficientes de correlação entre as variáveis relacionadas à rede rodoviária oficial e clandestina e a área desmatada variaram 0,97 a 1. O algoritmo *Random Forest*, utilizando *Python 3.7*, foi o que apresentou melhor desempenho e melhores resultados nas simulações realizadas, com erro médio absoluto de 2.425,30 km² e desvio padrão de 2.345,33 km². Pelos métodos avaliados, a curva apresentou uma tendência consistente de crescimento no desmatamento até 2050, sendo que na análise de regressão pelo método dos mínimos quadrados, as taxas de acréscimos decenal variaram de 4,64% a 11,54%, e o incremento na área desmatada de 72.417,93 km² (25,77 % da área atual). Na análise de regressão pelo método Holt-Winters, o comportamento da curva de sazonalidade de 15 anos apresentou um erro de 1,04%, o menor de todas as avaliações, seguido pelo valor de 1,63% do modelo de regressão pelo método dos mínimos quadrados.

Os resultados indicaram um crescimento bastante significativo após o ano de 2030, ainda que com taxas decrescentes, o que é muito preocupante, uma vez que esse modelo de desenvolvimento não contribuiu para a melhoria da qualidade de vida da população local e ainda compromete a sustentabilidade ambiental do planeta. Cabe destacar que o Brasil assumiu compromisso formal, através da Contribuição Nacionalmente Determinada, firmado na COP 21, em Paris, para zerar o desmatamento (BRASIL, 2015) e recentemente reafirmado na COP 26.

A expansão da malha rodoviária na Calha Norte, região mais preservada do estado do Pará, prevista no planejamento viário do DNIT e ratificada no projeto Barão do Rio Branco, provavelmente promoverá um desmatamento descontrolado naquela região. Conforme os resultados obtidos na análise de sensibilidade aplicada ao modelo

desenvolvido, as ameaças de desmatamento proveniente da construção das rodovias BR-163 e BR-210 indicam uma área de 4.703,43 km² de desmatamento para um cenário mais otimista, e de 6.567,48 km² de área desmatada num cenário mais pessimista, considerando a existência da rede clandestina. Outros projetos que envolvem a ampliação da rede rodoviária na Amazônia, como a retomada de antigas propostas tais como a expansão da BR-364 e repavimentação da BR-319 consistem também em graves ameaças à preservação da floresta, principalmente pela ausência de governança.

A tese demonstrou que o modal rodoviário é muito prejudicial para a floresta. O planejamento de transportes da região amazônica precisa priorizar a sustentabilidade de forma a impedir efeitos irreversíveis e fortes danos socioambientais, privilegiando a implantação de outros modais como o hidroviário, pela própria vocação natural da região, provocando assim menos impactos ambientais e culturais, sendo outra alternativa os sistemas ferroviários.

Os resultados obtidos desse tratamento matemático, mais robusto, corroboram com conclusões qualitativas disponíveis na literatura que abordam a forte influência da rede rodoviária no desmatamento da floresta (ALAMGIR *et al.*, 2017; GALLICE *et al.*, 2019; IBISCH *et al.*, 2016; NOBRE *et al.*, 2016; TROMBULAK; FRISSELL, 2000) apontando também para a importância da compreensão do comportamento dos diferentes fatores responsáveis pelo desmatamento e das ameaças causadas pela expansão da rede rodoviária, principalmente aos tomadores de decisão, planejadores e comunidade científica. É preciso salientar a importância de estudos para o entendimento das ameaças à Amazônia, e que a sociedade desperte para a gravidade do problema, o risco de extinção dos recursos naturais e a relevância da participação desses atores para definição do projeto de desenvolvimento da Amazônia.

As consequências mais graves do desmatamento são a perda de biodiversidade, aumento do risco de extinção de animais silvestres e destruição dos serviços ecológicos prestados pela floresta, como a manutenção do clima e do ciclo hidrológico.

O Brasil e mais de cem países assinaram um acordo para proteção de florestas que tem como meta zerar o desmatamento ilegal no mundo até 2030. Denominado *Forest Deal*, foi negociado durante a COP26, a conferência das Nações Unidas sobre mudanças climáticas, em novembro de 2021, em Glasgow, na Escócia. Portanto, é fundamental a adoção de critérios mais rigorosos para a expansão da rede rodoviária, combate ao surgimento de estradas clandestinas com o propósito de desmatar, cumprimento da legislação ambiental e a elaboração de um modelo de desenvolvimento sustentável para a Amazônia, acompanhado de revisão da matriz modal para a região.

Esta tese tem como propósito colaborar no debate para elaboração de políticas públicas para um modelo de desenvolvimento sustentável, assim como fornecer elementos para as estratégias de conservação da Floresta Amazônica e concluir, então, que estudos de impactos ambientais, em especial de natureza quantitativa, são muito importantes na análise da viabilidade, adequabilidade e sustentabilidade de projetos de transportes na Amazônia.

7.1 Sugestão para Estudos Futuros

É consenso na literatura científica que o valor da floresta intacta é muito superior à renda gerada pelas atividades que provocam o desmatamento (pecuária, agronegócio, mineração) (COSTANZA *et al.*, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2021; STRAND *et al.*, 2018). Estudos posteriores podem realizar análises econômicas das perdas em decorrência ao desmatamento espacial na Calha Norte, executar simulações semelhantes utilizando outros algoritmos do aprendizado de máquinas, considerar outros modos de transporte e assim incorporar nas análises de custo-benefício do planejamento de transporte, as perdas econômicas das florestas a serem desmatadas, como também realizar simulações sobre a redução da participação do modal rodoviário na matriz de transporte.

Outra proposta é a realização de estudos semelhantes considerando a análise temporal, ou melhor, investigar como o desmatamento ocorre ao longo do tempo após a implantação de rodovias, análises sobre melhoramentos como repavimentação, duplicação de vias na malha rodoviária existente e a influência na taxa de desmatamento, isto é, os impactos na floresta devido aos investimentos em rodovias pré-existentes. Além disso, estudos sobre a expansão da rede rodoviária clandestina ao longo do tempo e a existência de hierarquização viária no conjunto viário clandestino. Sugere-se também a aplicação de outros algoritmos no banco de dados disponibilizado nesta tese para análises comparativas de previsão de desmatamento.

Um estudo de relevância seria a análise de cenários do processo de desmatamento considerando a existência de outros modos de transporte mais sustentáveis, como o ferroviário integrado ao hidroviário, ou mesmo uma análise multimodal considerando outros traçados de rodovias na região da Calha Norte. Ensaios comparativos utilizando a implantação de outros modos de transporte como infraestrutura local ou mesmo alteração das rotas propostas permite a elaboração de cenários que inibam o desmatamento.

A governança é um aspecto de grande influência no processo de desmatamento e poderia ser introduzido em estudos e análises posteriores. É importante a elaboração de trabalhos que permitam à comunidade científica apresentar estudos consistentes que de fato contribuam para a construção de políticas e ações de combate ao desmatamento ilegal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Francisco de A. M.; DUARTE, André M.; RIBEIRO, Mário R. O valor de “não-uso”: possibilidade econômica para a Amazônia. **Parcerias Estratégicas**, [S. l.], v. 21, p. 137–158, 2005.

Agência Pará de Notícias. 2021. Disponível em: <https://www.agenciapara.com.br/>. Acesso em: 6 maio. 2021.

ALAMGIR, Mohammed; CAMPBELL, Mason J.; SLOAN, Sean; GOOSEM, Miriam; CLEMENTS, Gopalasamy; MAHMOUD, Mahmoud I.; LAURANCE, William F. **Economic, Socio-Political and Environmental Risks of Road Development in the Tropics** *Current Biology* Cell Press, , 2017. DOI: 10.1016/j.cub.2017.08.067.

ÂNGELO, Humberto; DE SÁ, Silvio Pedreira Pereira. O desflorestamento na Amazônia Brasileira. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 17, n. 3, p. 217–227, 2007. DOI: 10.5902/198050981953.

APIB; COIAB; APOIANP; FEPIPA. **Nota Técnica sobre o Projeto Barão do Rio Branco**. 2019. Disponível em: <http://cpisp.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Nota-APIB-Programa-Rio-Branco.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2021.

ARAUJO, Jonathas Vinícius Gonzaga Alves; SANTOS, Marcos Dos; GOMES, Carlos Francisco Simões. Desenvolvimento De Um Código Em Python Para Geração De Matrizes De Correlação De Pearson Com Laços a Partir De “N” Variáveis Tomadas Duas a Duas. [S. l.], p. 1090–1099, 2020. DOI: 10.5151/spolm2019-080.

AROEIRA, André. **Total da área desmatada na Amazônia em 2020 já é maior que cidade de São Paulo**. 2020. Disponível em: <https://www.oeco.org.br/reportagens/total-da-area-desmatada-na-amazonia-em-2020-ja-e-maior-que-cidade-de-sao-paulo/>.

ARRAES, Ronaldo de Albuquerque; MARIANO, Francisca Zilania; SIMONASSI, Andrei Gomes. Causas do desmatamento no Brasil e seu ordenamento no contexto mundial. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, [S. l.], v. 50, n. 1, p. 119–140, 2012. DOI: 10.1590/S0103-20032012000100007.

AZEVEDO, Tasso Rezende De; ROSA, Marcos Reis; SHIMBO, Julia Zanin; MARTIN,

Eduardo Velez; OLIVEIRA, Magaly Gonzales De. Relatório Anual do Desmatamento no Brasil. **Mapbiomas**, [S. l.], p. 49, 2020. Disponível em: <https://s3.amazonaws.com/alerta.mapbiomas.org/relatrios/MBI-relatorio-desmatamento-2019-FINAL5.pdf>.

BACHI JUNIOR, Dante; TIAGO FILHO, Geraldo Lucio; SEYDELL, Maria Rachel Russo. Social, technical-economic, environmental and political assessment for the evaluation of transport modes for petroleum products. **Journal of Transport Literature**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 25–29, 2016. DOI: 10.1590/2238-1031.jtl.v10n1a5.

BARBER, Christopher P.; COCHRANE, Mark A.; SOUZA, Carlos M.; LAURANCE, William F. Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the Amazon. **Biological Conservation**, [S. l.], v. 177, p. 203–209, 2014. DOI: 10.1016/J.BIOCON.2014.07.004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000632071400264X?via%3Dihub>. Acesso em: 16 ago. 2019.

BRANDÃO, A. O.; SOUZA, C. M. Mapping unofficial roads with Landsat images: A new tool to improve the monitoring of the Brazilian Amazon rainforest. **International Journal of Remote Sensing**, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 177–189, 2006. DOI: 10.1080/01431160500353841.

BRASIL. **Lei no. 586 de 06 de setembro de 1850** Rio de Janeiro, RJ, 1850.

BRASIL. **Decreto no. 8.324 de 27 de Outubro de 1910**, 1910. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1910-1919/decreto-8324-27-outubro-1910-527901-publicacaooriginal-1-pe.html>.

BRASIL. **Lei Federal n. 1.806, de 06 de janeiro de 1953** Rio de Janeiro, RJ, 1953.

BRASIL. **Decreto s/n de 03/07/2003**. 2003. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/dnn/2003/dnn9922.htm.

BRASIL. Plano de Desenvolvimento Sustentável para a Área de Influência da BR-163 - Oficina de Consulta à Sociedade Local à. **Grupo de Trabalho Interministerial**, [S. l.], p. 44, 2004. a.

BRASIL. **Decreto de 15 de março de 2004**, 2004. b.

BRASIL. **Contribuição Nacionalmente Determinada. Acordo de Paris**, 2015. Disponível em: https://www.mma.gov.br/images/arquivo/80108/BRASIL_iNDC_portugues_FINAL.pdf.

BRASIL. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE**. 2019a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 12 out. 2019.

BRASIL. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA**. 2019b. Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>. Acesso em: 30 set. 2019.

BRASIL. **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT**. 2019c. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/>. Acesso em: 25 set. 2019.

BRASIL. **Conclusão da BR-163 até Miritituba**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2020/02/conclusao-da-br-163-ate-miritituba-pa-sera-entregue-nesta-sexta-feira>. Acesso em: 12 set. 2021.

BRASIL, Presidência da República. **O que é o Programa Barão do Rio Branco?** 2019d. Disponível em: <https://www.gov.br/secretariageral/pt-br/noticias/2019/setembro/o-que-e-o-programa-barao-do-rio-branco>. Acesso em: 21 jan. 2020.

BREIMAN. **Random Forest Regression**. 2001. Disponível em: <https://towardsdatascience.com/random-forest-and-its-implementation-71824ced454f>.

BRITO, Rosane; CASTRO, Edna. Desenvolvimento e conflitos na Amazônia: um olhar sobre a colonialidade dos processos em curso na BR-163. **Revista NERA**, [S. l.], v. 1, n. 42, p. 51–73, 2018. DOI: 10.47946/rnera.v0i42.5679.

BROWN, David S.; BROWN, J. Christopher; BROWN, Courtenay. Land occupations and deforestation in the Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, [S. l.], v. 54, p. 331–338, 2016. DOI: 10.1016/J.LANDUSEPOL.2016.02.003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837716000193>. Acesso em: 2 out. 2019.

BUILTIN. **A Complete Guide to the Random Forest Algorithm**. 2019. Disponível em: <https://builtin.com/data-science/random-forest-algorithm>. Acesso em: 2 maio. 2021.

CALHEIROS, Carla S. Metodologia de tarifa para transporte fluvial de passageiros na Amazônia. Tese de Doutorado. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. p. 153, 2010. Disponível em: http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_d/CarlaSouzaCalheiros.pdf.

CARDOSO, Dalton. **Sistema de Monitoramento da Exploração Madeireira (Simex): Estado do Pará 2017-2018** Belém, PA, 2020. Disponível em: https://amazon.org.br/wp-content/uploads/2020/04/Simex_Imazon_2017-2018.pdf.

CARVALHO, Evelyn G. A.; BLANCO, Claudio José C.; DUARTE, André A. A. M.; MAUÉS, Luiz Maurício F. Decision support system for hydro power plants in amazon considering the cost of externalities. **International Journal of Energy Economics and Policy**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 40–47, 2020. DOI: 10.32479/ijeep.8746.

CAVALCANTI, Flavio. **Ferrovias da Amazônia**. 2020. Disponível em: <http://vfco.brazilia.jor.br/ferrovias-da-amazonia.shtml>. Acesso em: 29 out. 2021.

CNT. **Falta investimento no sistema hidroviário brasileiro**. 2019. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/falta-investimento-no-sistema-hidrovirio-brasileiro>. Acesso em: 25 set. 2021.

COSTA, H. M. **Cobertura da Terra em propriedades privadas na Amazônia: Dinâmica de desmatamento e remanescente florestal**. 2017. Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2017.

COSTANZA, Robert; DE GROOT, Rudolf; SUTTON, Paul; VAN DER PLOEG, Sander; ANDERSON, Sharolyn J.; KUBISZEWSKI, Ida; FARBER, Stephen; TURNER, R. Kerry. Changes in the global value of ecosystem services. **Global Environmental Change**, [S. l.], v. 26, n. 1, p. 152–158, 2014. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>.

DA CUNHA, Alan Cavalcanti; DE ABREU, Carlos Henrique Medeiros; CRIZANTO, Jonathan Luz Pires; CUNHA, Helenilza Ferreira Albuquerque; BRITO, Alaan Ubaiara; PEREIRA, Newton Narciso. Modeling pollutant dispersion scenarios in high vessel-traffic

areas of the Lower Amazon River. **Marine Pollution Bulletin**, [S. l.], v. 168, p. 112404, 2021. DOI: 10.1016/J.MARPOLBUL.2021.112404.

DAMASCENO, Santos; FILOCRE, Monteiro; NESTE, N. A rodovia BR 210 : Uma análise para o desenvolvimento socioeconômico no município de Serra do Navio – AP. **XVIII ENANPUR**, Natal RN, p. 0–16, 2019. Disponível em: <http://anpur.org.br/xviiienanpur/anais>.

DATASCIENCE. **K Means clustering no aprendizado de máquinas**. 2019. Disponível em: <https://datascience.eu/pt/aprendizado-de-maquina/k-significa-clustering-no-aprendizado-de-maquinas/>. Acesso em: 13 ago. 2021.

DNIT. Terminologias rodoviárias usualmente utilizadas. [S. l.], n. 61, p. 14, 2007. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transporte-terrestre/rodovias-federais/arquivos/terminologias-rodoviarias-versao-11-1.pdf>.

DNIT. **Resumo PNV**. 2019. Disponível em: [http://servicos.dnit.gov.br/dnitcloud/index.php/s/oTpPRmYs5AAdiNr?path=%2FHistórico%20Planilhas%20\(1994-2010\)%2FPNV Resumos \(2001-2010\) \(XLS\)](http://servicos.dnit.gov.br/dnitcloud/index.php/s/oTpPRmYs5AAdiNr?path=%2FHistórico%20Planilhas%20(1994-2010)%2FPNV%20Resumos%20(2001-2010)%20(XLS)). Acesso em: 2 out. 2019.

DOUGLAS-SMITH, Dominique; IWANAGA, Takuya; CROKE, Barry F. W.; JAKEMAN, Anthony J. Certain trends in uncertainty and sensitivity analysis: An overview of software tools and techniques. **Environmental Modelling and Software**, [S. l.], v. 124, n. November 2019, p. 104588, 2020. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.104588. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104588>.

DUARTE, André M. **O valor econômico e estratégico das águas da Amazônia**. Tese de Doutorado, Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil. 2006.

EXPERTSYSTEM. **What is Machine Learning? A definition**. 2020. Disponível em: <https://www.expert.ai/blog/machine-learning-definition/>. Acesso em: 4 dez. 2020.

FACUNDES, F. S.; LIMA, R. A. P.; SANTOS, V. F. Expansão da rede viária na Amazônia oriental, rodovia Perimetral Norte, Amapá. **Revista Franco-Brasileira de Geografia**, [S. l.], v. 42, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4000/confins.23789>. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/23789#ftn2>.

FAEPA. **Agronegócio Paraense**. 2021. Disponível em: <http://sistemafaepa.com.br/faepa/agronegocio-paraense/>. Acesso em: 12 out. 2021.

FEARNSIDE, Philip M. Avança Brasil: Environmental and social consequences of Brazil's planned infrastructure in Amazonia. **Environmental Management**, [S. l.], v. 30, n. 6, p. 735–747, 2002. DOI: 10.1007/s00267-002-2788-2.

FEARNSIDE, Philip M. Carga Pesada. O custo ambiental de asfaltar um corredor de soja na Amazônia. Amazônia revelada Os descaminhos ao longo da BR -163. *In: Amazônia Revelada*. Brasília, DF. p. 397–424.

FEARNSIDE, Philip Martin. A tomada de decisão sobre grandes estradas amazônicas. *In: EDITORA DO INPA (org.). Destruição e Conservação da Floresta Amazônica*. 1. ed. Manaus. p. 327–337. Disponível em: http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/2019/Destruicao-v1/Cap-17-Grandes_estradas-prova.pdf.

FERRANTE, Lucas; BENTO, Maryane; ANDRADE, Trindade De; LEITE, Luciana; SILVA, Antonio C. Jr.; MARCONDES, Geraldo; CAMPOLINA, Daniela; DIELE VIEGAS, Luisa M.; FEARNSIDE, Philip M. Brazils Highway BR-319 : The road to the collapse of the Amazon and the violation of indigenous rights. **ERDE**, [S. l.], v. 152, n. 1, p. 1–6, 2021. DOI: 10.12854/erde-2021-552.

FERRANTE, Lucas; FEARNSIDE, Philip M. **The Amazon's road to deforestation***Science*, 2020. DOI: 10.1126/science.abd6977.

FERRANTE, Lucas; GOMES, Mércio; FEARNSIDE, Philip M. Amazonian indigenous peoples are threatened by Brazil's Highway BR-319. **Land Use Policy**, [S. l.], v. 94, p. 104548, 2020. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104548.

FERRETTI, Federico; SALTELLI, Andrea; TARANTOLA, Stefano. Trends in sensitivity analysis practice in the last decade. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 568, p. 666–670, 2016. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.133. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.133>.

FOGLIATTI, Maria Cristina; FILIPPO, Sandro; GOUDARD, Beatriz. **Avaliação de**

Impactos Ambientais: Aplicação aos Sistemas de Transporte. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2004.

GALLICE, Geoffrey R.; LARREA-GALLEGOS, Gustavo; VÁSQUEZ-ROWE, Ian. The threat of road expansion in the Peruvian Amazon. **ORYX**, [S. l.], v. 53, n. 2, 2019. DOI: 10.1017/S0030605317000412.

GARDNER, M. W.; DORLING, S. R. Artificial neural networks (the multilayer perceptron) - a review of applications in the atmospheric sciences. **Atmospheric Environment**, [S. l.], v. 32, n. 14–15, p. 2627–2636, 1998. DOI: 10.1016/S1352-2310(97)00447-0.

GRANDELLE, Renato. Desmatamento sobe 359% em um ano ao redor da BR-163. **Globo**, [S. l.], 2021. Disponível em: <https://extra.globo.com/noticias/um-so-planeta/desmatamento-sobe-359-em-um-ano-ao-redor-da-br-163-rv1-1-25086605.html>.

HAGAN, Martin; DEMUTH, Howard; BEALE, Mark. **Neural Network Design**. 2. ed. Oklahoma, United States.

HO, Tin Kam. ICDAR '95: Proceedings of the Third International Conference on Document Analysis and Recognition (Volume 1) - Volume 1. *In*: RANDOM DECISION FORESTS 1995, USA. **Anais [...]**. USA: IEEE Computer Society, 1995.

HOCHARD, Sébastien; PINAZO, Christel; GRENZ, Christian; EVANS, Jessica L. Burto.; PRINGAULT, Olivier. Impact of microphytobenthos on the sediment biogeochemical cycles: A modeling approach. **Ecological Modelling**, [S. l.], v. 221, n. 13–14, p. 1687–1701, 2010. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.04.002.

HOMMA, Alfredo K. O. Madeira na Amazônia: extração, manejo ou reflorestamento? **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, [S. l.], v. 7, p. 147–162, 2011. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/74185/1/HommaAmazonia.pdf>.

HUERTAS, Daniel M. **Território e circulação. Transporte rodoviário de carga no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Editora Unifesp, 2018.

IBGE. **IBGE atualiza mapa da Amazônia Legal**. 2020. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/28089-ibge-atualiza-mapa-da-amazonia-legal>. Acesso em: 5 jan.

2021.

IBGE. **População estimada**. 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa>. Acesso em: 10 out. 2021.

IBISCH, Pierre L. et al. A global map of roadless areas and their conservation status. *Science*, [S. l.], v. 354, n. 6318, 2016. DOI: 10.1126/science.aaf7166.

IMAZON. **Unidades de conservação estaduais do Pará na região da Calha Norte do rio Amazonas**. 2012. Disponível em: <https://imazon.org.br/unidades-de-conservacao-estaduais-do-para-na-regiao-da-calha-norte-do-rio-amazonas/>. Acesso em: 25 ago. 2021.

IMAZON. **O estado da Amazônia: Uso da terra**. 2018. Disponível em: <https://imazon.org.br/wp-content/uploads/2015/01/image-3.jpg>. Acesso em: 12 abr. 2021.

IMAZON. **Entenda o sistema de monitoramento do Imazon**. 2019. Disponível em: <https://imazon.org.br/publicacoes/faq-sad/>. Acesso em: 12 abr. 2021.

IMAZON. **Municípios que mais desmatam têm pior qualidade de vida na Amazônia**. 2021a. Disponível em: <https://imazon.org.br/imprensa/municipios-que-mais-desmatam-tem-pior-qualidade-de-vida-na-amazonia/>. Acesso em: 8 dez. 2021.

IMAZON. **Desmatamento na Amazônia cresce 30% em 2020 e bate recorde dos últimos dez anos**. 2021b. Disponível em: <https://imazon.org.br/imprensa/desmatamento-na-amazonia-cresce-30-em-um-2020-e-bate-recorde-dos-ultimos-dez-anos/>. Acesso em: 22 jan. 2021.

INCRA. **Infraestrutura**. 2020. Disponível em: <https://antigo.incra.gov.br/pt/infraestrutura-atuacao.html>. Acesso em: 10 ago. 2021.

INPE. **TerraClass: Projetos e pesquisas**. 2019a. Disponível em: http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/dados_terraclass.php. Acesso em: 23 set. 2021.

INPE. **Plataforma Terra Brasilis**. 2019b. Disponível em:

<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/map/deforestation?hl=pt-br>. Acesso em: 5 out. 2019.

INPE. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. 2020. Disponível em: <http://www.inpe.br/faq/index.php?pai=6>. Acesso em: 28 dez. 2020.

INPE. **PRODES**. 2021a. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>.

INPE. **Plataforma Terra Brasilis**. 2021b. Disponível em: <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/map/deforestation?hl=pt-br>. Acesso em: 24 abr. 2021.

INPE. **DETER**. 2021c. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/deter/deter>. Acesso em: 12 abr. 2021.

IPCC. **Climate Change 2021. The Physical Science Basis**. 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf. Acesso em: 10 out. 2021.

IPEA. **Rede Básica de Transportes da Amazônia. Texto para discussão N.562**. 1998. DOI: ISSN 1415-4765. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_0562.pdf.

IPEA. **Plano Amazônia Sustentável: Interações dinâmicas e sustentabilidade ambiental. Texto para discussão N.1731**. 2012. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_1731.pdf. Acesso em: 15 maio. 2020.

IPEADATA. **Renda domiciliar per capita [banco de dados]**. 2014. Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>. Acesso em: 7 out. 2019.

ISA. **Povos Indígenas no Brasil**. 2004. Disponível em: <https://pib.socioambiental.org/pt/Povo:Panará>. Acesso em: 12 set. 2021.

KAPLAN, Andreas; HAENLEIN, Michael. **Siri, Siri, in my hand: Who's the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence** *Business Horizons* Elsevier Ltd, , 2019. DOI:

10.1016/j.bushor.2018.08.004.

LAURANCE, W. F.; COCHRANE, M. A.; BERGEN, S.; FEARNSIDE, P. M.; DELAMÔNICA, P.; BARBER, C.; D'ANGELO, S.; FERNANDES, T. **The future of the Brazilian Amazon***Science*, 2001. DOI: 10.1126/science.291.5503.438.

LAURANCE, William F.; CAMPBELL, Mason J.; ALAMGIR, Mohammed; MAHMOUD, Mahmoud I. Road expansion and the fate of Africa's tropical forests. **Frontiers in Ecology and Evolution**, [S. l.], v. 5, n. JUL, 2017. DOI: 10.3389/fevo.2017.00075.

LAURANCE, William F.; PELETIER-JELLEMA, Anna; GEENEN, Bart; KOSTER, Harko; VERWEIJ, Pita; VAN DIJCK, Pitou; LOVEJOY, Thomas E.; SCHLEICHER, Judith; VAN KUIJK, Marijke. **Reducing the global environmental impacts of rapid infrastructure expansion***Current Biology*, 2015. DOI: 10.1016/j.cub.2015.02.050.

LECUN, Yann; HUANG, Fu Jie; BOTTOU, Léon. Learning methods for generic object recognition with invariance to pose and lighting. **Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, [S. l.], v. 2, 2004. DOI: 10.1109/cvpr.2004.1315150.

LIMA, R. A. P. De; PORTO, J. L. R. **Ordenamento territorial amapaense: dinâmicas de um estado brasileiro na fronteira Amazônia** Barcelona Colóquio Internacional de Geocrítica, , 2008. Disponível em: <http://www.ub.edu/geocrit/-xcol/100.htm>.

LIMA NETO, Oswaldo; BRASILEIRO, Anísio; SANTOS, Enilson M.; ARAGÃO, Joaquim J. G.; ORRICO FILHO, Rômulo D. **Transportes no Brasil: história e reflexões**. 2. ed. Recife, PE: Editora Universitária da UFPE, 2001.

LOBO, Felipe; COSTA, Maycira; NOVO, Evlyn; TELMER, Kevin. Effects of Small-Scale Gold Mining Tailings on the Underwater Light Field in the Tapajós River Basin, Brazilian Amazon. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 9, n. 8, p. 861, 2017. DOI: 10.3390/rs9080861. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2072-4292/9/8/861>. Acesso em: 25 out. 2019.

LOUPPE, Gilles. Understanding Random Forests: From Theory to Practice. [S. l.], 2014. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1407.7502>. Acesso em: 8 abr. 2020.

MAPBIOMAS. **Área ocupada pela mineração no Brasil cresce mais de seis vezes**

entre 1985 e 2020. 2021. Disponível em: <https://mapbiomas.org/area-ocupada-pela-mineracao-no-brasil-cresce-mais-de-6-vezes-entre-1985-e-2020>. Acesso em: 15 out. 2021.

MARIN, Rosa E. A. Civilização do Rio, Civilização da Estrada: Transportes na ocupação da Amazônia no século XIX e XX. **Papers do NAEA**, [S. l.], v. n. 170, p. 25, 2004.

MATHWORKS. **Gene Expression Analysis.** 2020. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/gene-expression-analysis.html>. Acesso em: 1 jun. 2020.

MEIJER, Johan R.; HUIJBREGTS, Mark A. J.; SCHOTTEN, Kees C. G. J.; SCHIPPER, Aafke M. Global patterns of current and future road infrastructure. **Environmental Research Letters**, [S. l.], v. 13, n. 6, 2018. DOI: 10.1088/1748-9326/aabd42.

MELLO, Natália Girão Rodrigues De; ARTAXO, Paulo. Evolução do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal. **Revista do Instituto de Estudos Brasileiros**, [S. l.], n. 66, p. 108, 2017. DOI: 10.11606/issn.2316-901x.v0i66p108-129.

MINFRA. **Transportes no Brasil - Síntese histórica.** 2016. Disponível em: <https://canaldoservidor.infraestrutura.gov.br/conteudo/136-transportes-no-brasil-sintese-historica.html#republica>. Acesso em: 14 dez. 2020.

MINFRA. **Infraestrutura_Banco de Dados.** 2019. Disponível em: https://www.transportes.gov.br/images/BIT_TESTE/Publicacoes/Tabelas_AET_2018/03_infraestrutura/3.1.3.xlsx. Acesso em: 2 out. 2019.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Caderno da Região Hidrográfica Amazônica** Brasília, DF ISBN 85-7738-065-3, , 2006.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Biomass>Amazônia.** 2020. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/biomass/amazonia.html>.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do PNLT Relatório Final.** Brasília, DF, 2012. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/pnlt-2011.pdf>.

MMA. Plano BR163 Sustentavel Proposta final. [S. l.], v. 163, p. 1–24, 2004. Disponível em: [http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/Dossie/BR-163/Documentos Oficiais/Plano BR163 Sustentavel Proposta final_ 29.01.2004.pdf](http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/Dossie/BR-163/Documentos%20Oficiais/Plano%20BR163%20Sustentavel%20Proposta%20final_29.01.2004.pdf).

MOHANTY, S.; CODELL, R. Sensitivity analysis methods for identifying influential parameters in a problem with a large number of random variables. **Management Information Systems**, [S. l.], p. 363–374, 2002.

MONAI, Remedio. **Arco Norte: O desafio logístico** Brasília DF, 2016. Disponível em: <https://livraria.camara.leg.br/arco-norte-um-desafio-logistico>.

MOREIRA, Carlos; JÚNIOR, Souza; GABRIELA, Júlia; RIBEIRO, Ferreira. Desmatamento e Estradas não-oficiais da Amazônia. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, [S. l.], p. 2357–2364, 2007.

MOREIRA, Fabiano; ROISENBERG, Mauro. Reconhecimento e Classificação de Padrões de Imagens de Núcleos de Linfócitos do Sangue Periférico Humano. [S. l.], p. 7–13, 2016. DOI: 10.21528/cbrn2003-002.

MORGADO, Andrea Vaz; PORTUGAL, Licínio da Silva; MELLO, Andréa J. R. Acessibilidade na Região Amazônica através do transporte hidroviário. **Journal of Transport Literature**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 97–123, 2013. DOI: 10.1590/S2238-10312013000200006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2238-10312013000200006&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 27 mar. 2021.

MOUTINHO, Paulo; GUERRA, Raissa. **Deforestation in the Brazilian Amazon in 2016: the Lazy Dragon Woke Up**. 2016. Disponível em: <https://blog.ucsusa.org/science-blogger/deforestation-in-the-brazilian-amazon-in-2016-the-lazy-dragon-woke-up>.

NEPSTAD, Daniel et al. Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests. **Forest Ecology and Management**, [S. l.], v. 154, n. 3, p. 395–407, 2001. DOI: 10.1016/S0378-1127(01)00511-4.

NEVES, Patricia B. T. Das. Potencial de integração com o transporte hidroviário. *In*:

ANTP (org.). **Caderno Técnico. Volume 5.** São Paulo. p. 165. Disponível em: http://files-server.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2016/02/24/844ED48C-AD51-4C8E-A50C-15B4E13548EE.pdf.

NOBRE, Carlos A.; SAMPAIO, Gilvan; BORMA, Laura S.; CASTILLA-RUBIO, Juan Carlos; SILVA, José S.; CARDOSO, Manoel. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [S. l.], v. 113, n. 39, p. 10759–10768, 2016. DOI: 10.1073/PNAS.1605516113. Disponível em: <https://www.pnas.org/content/113/39/10759>. Acesso em: 21 out. 2019.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. IPCC AR6, WG1: Resumo Comentado. **Observatório do Clima**, [S. l.], v. 2, p. 10, 2021.

OECD. **O que é a Amazônia Legal.** 2020. Disponível em: <https://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/28783-o-que-e-a-amazonia-legal/>. Acesso em: 28 dez. 2020.

OLIVEIRA, A. S.; SOARES-FILHO, B. S.; OLIVEIRA, U.; VAN DER HOFF, R.; CARVALHO-RIBEIRO, S. M.; OLIVEIRA, A. R.; SCHEEPERS, L. C.; VARGAS, B. A.; RAJÃO, R. G. Costs and effectiveness of public and private fire management programs in the Brazilian Amazon and Cerrado. **Forest Policy and Economics**, [S. l.], v. 127, p. 102447, 2021. DOI: 10.1016/j.forpol.2021.102447.

OLIVEIRA, I.; SALES, H.; LACERDA, E. Rodovias na Amazônia e os processos de territorialização: o caso da BR-210, Sudeste de Roraima. **Revista Geográfica Acadêmica**, [S. l.], v. 15, n. 1678–7226, p. 21–32, 2021.

OLIVEIRA NETO, Thiago. Rodovias na Amazônia: O projeto de entrecortar o território através da Perimetral Norte Br-210. **Examãpaku**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 25, 2015. DOI: 10.18227/1983-9065ex.v8i3.3091.

ONU. **Report of the world Commission on Environment and Development.** 1987. Disponível em: <https://ambiente.files.wordpress.com/2011/03/brundtland-report-our-common-future.pdf>.

OPENANN. **Pole Balancing**. 2020. Disponível em: <https://openann.github.io/OpenANN-apidoc/PB.html>. Acesso em: 10 nov. 2020.

OPER. **Coeficientes de correlação**. 2020. Disponível em: <https://operdata.com.br/blog/coeficientes-de-correlacao/>. Acesso em: 30 out. 2021.

ORRICO FILHO, Rômulo D. Transporte e desenvolvimento Uma reflexão sobre a pavimentação da BR-163. *In: Amazônia Revelada*. Brasília DF. p. 425–458.2005.

OVIEDO, Antônio. **Desmatamento por mineração na Amazônia bate recorde em 2021; área devastada até agosto já supera todo o ano de 2020**. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/natureza/amazonia/noticia/2021/08/27/desmatamento-por-mineracao-na-amazonia-bate-recorde-em-2021-area-devastada-ate-agosto-ja-supera-todo-o-ano-de-2020.ghtml>. Acesso em: 20 out. 2021.

PASSOS, Sousa; FILLION, Myriam; JOSE, Carlos; MERGLER, Donna; DAVE, Jean Remy. Quality of Life and Health Perceptions Among Fish-Eating Communities of the Brazilian Amazon: An Ecosystem Approach to Well-Being. *[S. l.]*, p. 121–134, 2009. DOI: 10.1007/s10393-009-0235-z.

PASTRE, Rafael. Plano De Desenvolvimento Regional Br-163 Ações Estratégicas Em Infraestrutura Sobre O. **Revista de Economia Regional, Urbana e do Trabalho**, *[S. l.]*, v. 07, n. 2316–5235, p. 5–34, 2018.

PEREIRA, Juvenal. **Extração de Madeira**. 2020. Disponível em: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/areas_prioritarias/amazonia1/ameacas_riscos_amazonia/desmatamento_na_amazonia/extracao_de_madeira_na_amazonia/. Acesso em: 10 out. 2021.

PEREIRA, Newton Narciso; BOTTER, Rui Carlos; FOLENA, Rafael Dompieri; PEREIRA, José Pinheiro Fragoso Neto; DA CUNHA, Alan Cavalcanti. Ballast water: A threat to the Amazon Basin. **Marine Pollution Bulletin**, *[S. l.]*, v. 84, n. 1–2, p. 330–338, 2014. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2014.03.053. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.053>.

PFUFF, Alexander; BARBIERI, Alisson; LUDEWIGS, Thomas; MERRY, Frank; PERZ, Stephen; REIS, Eustaquio. Road Impacts in Brazilian Amazonia. *In: Amazonia and*

Global Change. [s.l.: s.n.]. p. 101–116. DOI: 10.1029/2008GM000736.

PIANOSI, Francesca; BEVEN, Keith; FREER, Jim; HALL, Jim W.; ROUGIER, Jonathan; STEPHENSON, David B.; WAGENER, Thorsten. Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. **Environmental Modelling and Software**, [S. l.], v. 79, p. 214–232, 2016. DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.02.008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008>.

PIANUCCI, M. N.; PITOMBO, C. S. Uso de árvore de decisão para previsão de geração de viagens como alternativa ao método de classificação cruzada. **Revista de Engenharia Civil**, [S. l.], n. 56, p. 5–13, 2019.

PINHEIRO, Tatiana. Brasil-Amazônia Legal. **Santander**, [S. l.], p. 4, 2018. Disponível em: https://cms.santander.com.br/sites/WPS/documentos/arq-estudos-macro-download-03-09-18/18-09-03_204721_180903-amazonia-legal.pdf.

PODER 360. Governo planeja nova estrada na Amazônia cortando parque nacional. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/governo/governo-planeja-nova-estrada-na-amazonia-cortando-parque-nacional/>.

POLICARPO, Mauricio Aquilante. Logística de transportes e modernização do território: a importância dos planos viários nacionais para a efetivação geoestratégica da mesorregião do triângulo mineiro/alto paranaíba. [S. l.], p. 1–19, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/334641989_LOGISTICA_DE_TRANSPORTES_E_MODERNIZACAO_DO_TERRITORIO_A_IMPORTANCIA_DOS_PLANOS_VIARIOS_NACIONAIS_PARA_A_EFETIVACAO_GEOESTRATEGICA_DA_MESORREGIAO_DO_TRIANGULO_MINEIROALTO_PARANAIBA.

PRATA, Gabriel Atticciati. **Mapeamento da probabilidade de incêndio e de cicatrizes de dano como suporte ao manejo florestal**. 2019. Universidade de São Paulo- USP, [S. l.], 2019.

PRATES, Rodolfo Coelho; BACHA, Carlos José Caetano. Análise da relação entre desmatamento e bem-estar da população da Amazônia Legal. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, [S. l.], v. 48, n. 1, p. 165–193, 2010. DOI: 10.1590/S0103-20032010000100008. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-

20032010000100008&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 27 out. 2019.

PREVISIA. **Plataforma web de previsão de desmatamento**. 2021. Disponível em: <https://previsia.org/>. Acesso em: 29 ago. 2021.

PRODES. **Coordenação-Geral de Observação da Terra**. [s.d.]. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: 18 mar. 2021.

BR ACIMA DE TUDO. Direção: Fred Mauro Rahal. Brasil: Eco, 2021.

RIBEIRO, Júlia N.; SOUZA JR., Carlos. **Estradas não-oficiais em áreas protegidas**. 2018. Disponível em: <https://imazon.org.br/publicacoes/estradas-nao-oficiais-em-areas-protegidas-ate-2012-e-2016/>. Acesso em: 20 nov. 2019.

RIBEIRO, Talita M. **Alteração do habitat: impacto das rodovias que a gente não vê**. 2021. Disponível em: <http://faunanews.com.br/2021/09/09/alteracao-de-habitat-impacto-das-rodovias-que-a-gente-nao-ve/>. Acesso em: 11 set. 2021.

RIVERO, Sérgio; ALMEIDA, Oriana; ÁVILA, Saulo; OLIVEIRA, Wesley. Pecuária e desmatamento: Uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. **Nova Economia**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 41–66, 2009. DOI: 10.1590/s0103-63512009000100003.

ROSA, MAYRA. **Cai desmatamento mas degradação continua a ocorrer na Amazônia**. 2013. Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/planeta/meio-ambiente/cai-desmatamento-mas-degradacao-continua-a-crescer-na-amazonia/>.

RUSSELL, Stuart J.; NORVIG, Peter. **Artificial Intelligence. A Modern Approach**. 3rd. ed. New Jersey: Ed. Englewood Cliffs, 2010.

SAMUEL, Arthur L. Some Studies in Machine Learning. **IBM Journal of Research and Development**, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 210–229, 1959. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5392560>.

SANT'ANNA, André Albuquerque; YOUNG, Carlos Eduardo Frickmann. Direitos de propriedade, desmatamento e conflitos rurais na Amazônia. **Economia Aplicada**, [S. l.],

v. 14, n. 3, p. 381–393, 2010. DOI: 10.1590/S1413-80502010000300006.

SANTOS, Diogo Corrêa; SOUZA-FILHO, Pedro Walfir Martins; DA ROCHA NASCIMENTO, Wilson; CARDOSO, Gustavo Freitas; DOS SANTOS, Jorge Filipe. Land cover change, landscape degradation, and restoration along a railway line in the Amazon biome, Brazil. **Land Degradation and Development**, [S. l.], v. 31, n. 15, p. 2033–2046, 2020. DOI: 10.1002/ldr.3514.

SANTOS, Marcelo. **Evolução do desmatamento em terras protegidas sob influência da rodovia BR-319, na região de Vila Realidade, Humaitá, Amazonas**. 2018. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, [S. l.], 2018.

SEEG. Gases de efeito estufa. Análise das emissões brasileiras e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2020. [S. l.], p. 49, 2021. Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/DocumentosAnaliticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf.

SHIMAKURA, Sílvia. **Coefficiente de correlação de postos de Spearman**. 2005. Disponível em: <http://www.leg.ufpr.br/~silvia/CE701/node80.html>. Acesso em: 13 jan. 2022.

SNIZEK JÚNIOR, Pedro Nessi; FIOR, Elton Mendes; SILVA, Millane Chaves Da; TADASHI, Herbert; LEANDRO, Thiago da Silva. Como o “Arco Norte” irá afetar a logística e exportações do estado de Mato Grosso. **Connection Line - Revista Eletrônica Do Univag**, [S. l.], v. 0, n. 17, p. 126–142, 2017. DOI: 10.18312/1980-7341.n17.2017.384. Disponível em: <https://periodicos.univag.com.br/index.php/CONNECTIONLINE/article/viewFile/384/596>.

SOARES, Filipe Menezes. **O governo Médici e o Programa de Integração Nacional (Norte e Nordeste): discursos e políticas governamentais (1969-1974)**. 2015. Universidade Federal de Pernambuco, [S. l.], 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/15711#.YV2gE7k2IEE.mendeley>. Acesso em: 6 out. 2021.

SONTER, Laura J.; HERRERA, Diego; BARRETT, Damian J.; GALFORD, Gillian L.; MORAN, Chris J.; SOARES-FILHO, Britaldo S. Mining drives extensive deforestation in

the Brazilian Amazon. **Nature Communications**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 1–7, 2017. DOI: 10.1038/s41467-017-00557-w. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-017-00557-w>.

SOUZA JR., Carlos; BRANDÃO JR., Amintas; ANDERSON, Anthony; VERÍSSIMO, Adalberto. **Avanço das estradas endógenas na Amazônia**. 2013. Disponível em: <https://imazon.org.br/avanco-das-estradas-endogenas-na-amazonia/>. Acesso em: 17 nov. 2019.

SOUZA JR, Carlos; RIBEIRO, Júlia; BOTELHO, Jonas; KIRCHHOFF, Frederic. **Advances on Earth observation and artificial intelligence to map unofficial roads in the Brazilian Amazon Bioma**. 2020. Disponível em: <https://agu.confex.com/agu/fm20/webprogram/Paper751644.html>. Acesso em: 17 jul. 2021.

STRAND, Jon et al. Spatially explicit valuation of the Brazilian Amazon Forest's Ecosystem Services. **Nature Sustainability**, [S. l.], v. 1, n. 11, p. 657–664, 2018. DOI: 10.1038/s41893-018-0175-0. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41893-018-0175-0>.

TALASKA, Alcione; ARANTES, Almir; FARIAS, José Antonio Assumpção. Redes técnicas e Estado brasileiro: um olhar sobre a formação do território na área de influência da rodovia br 163. **Caminhos de Geografia**, [S. l.], v. 13, n. 33, p. 53–65, 2010.

TROMBULAK, Stephen C.; FRISSELL, Christopher A. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. **Conservation Biology**, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 18–30, 2000. DOI: 10.1046/j.1523-1739.2000.99084.x.

TURING, Alan M. Computing machinery and intelligence. [S. l.], p. 433–460, 1950.

VERBURG, René; RODRIGUES, Saulo; LINDOSO, Diego; DEBORTOLI, Nathan; LITRE, Gabriela; BURSZTYN, Marcel. The impact of commodity price and conservation policy scenarios on deforestation and agricultural land use in a frontier area within the Amazon. **Land Use Policy**, [S. l.], v. 37, p. 14–26, 2014. DOI: 10.1016/j.landusepol.2012.10.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.10.003>.

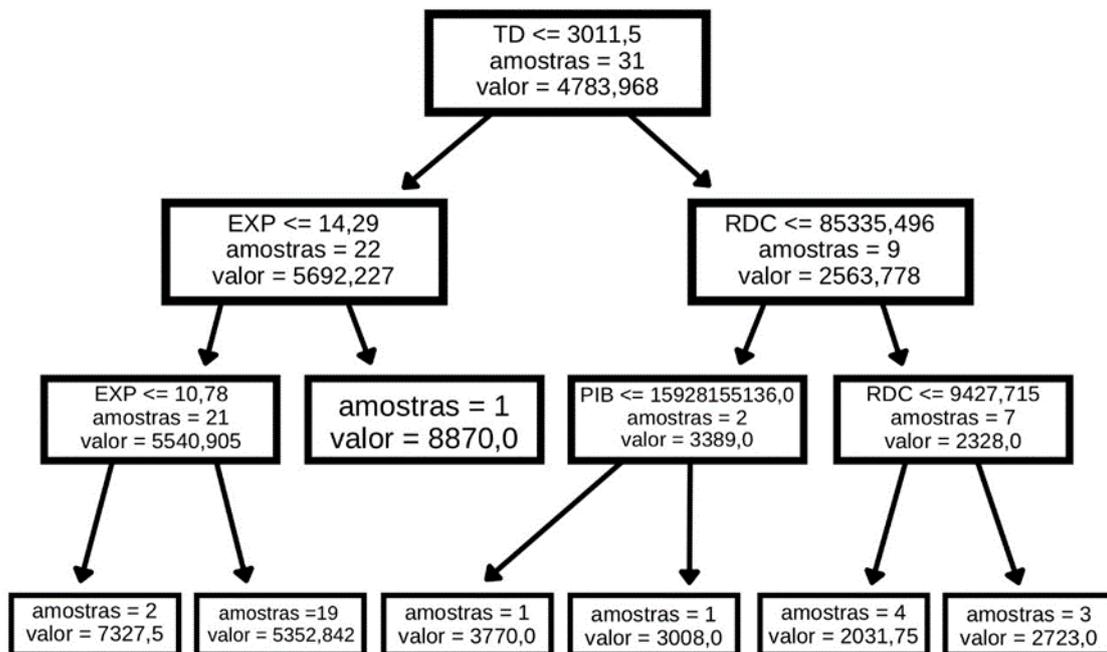
VIEIRA, Ilma. Pecuária é responsável por 80% do desmatamento na Amazônia, afirma pesquisadora. **Brasil de Fato**, [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.brasildefato.com.br/2019/09/05/pecuaria-e-responsavel-por-80-do-desmatamento-na-amazonia-afirma-pesquisadora>. Acesso em: 12 set. 2021.

VILELA, Thais et al. A better Amazon road network for people and the environment. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [S. l.], v. 117, n. 13, 2020. DOI: 10.1073/pnas.1910853117.

WENZEL, Fernanda; SÁ, Márcio Isensee. **Calha Norte: gado adentra maior área protegida de floresta tropical do mundo**. 2019. Disponível em: <https://www.oeco.org.br/reportagens/calha-norte-gado-adentra-maior-area-protegida-de-floresta-tropical-do-mundo/>. Acesso em: 5 out. 2021.

XINGU+, Rede. **Xingu Mais - BR-163**. 2020. Disponível em: <https://xingumais.org.br/obra/br-163-trecho-div-mtpa-santarem-pa>. Acesso em: 20 set. 2021.

APÊNDICE A – Árvore de decisão criada por um conjunto de dados.



APÊNDICE B - Finalização do treinamento *Random Forest*.

```
Classificando com Random Forest...
Iniciando GridSearch...
Melhor Parametro: {'criterion': 'mse', 'max_depth': 50, 'n_estimators': 51}
Melhor MAE: 2059.38
-----
Indice do Melhor CLF: 1
Indice do Melhor CLF: 2
Indice do Melhor CLF: 4
Indice do Melhor CLF: 12
Indice do Melhor CLF: 23
MAE: 2425.3010752688156
STD: 2345.3317166758397
Minimum MAE: 5.862745098042069
*****
RN 19.0 %
CRN 20.0 %
POP 16.0 %
HIPC 1.0 %
UR 0.0 %
HOM 13.0 %
GDP 18.0 %
EXP 13.0 %
ILL 0.0 %
█
```