



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

JOCEMARA VIANA DE SOUZA

**EXTRAÇÃO SELETIVA DE MADEIRAS NATIVAS
NO ESTADO DO PARÁ**

BRASÍLIA - DF

2022

JOCEMARA VIANA DE SOUZA

**EXTRAÇÃO SELETIVA DE MADEIRAS NATIVAS
NO ESTADO DO PARÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, do departamento de Engenharia Florestal, da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Eraldo A. T. Matricardi

BRASÍLIA - DF

2022

JOCEMARA VIANA DE SOUZA

**EXTRAÇÃO SELETIVA DE MADEIRAS NATIVAS
NO ESTADO DO PARÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, do departamento de Engenharia Florestal, da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi
Professor do Departamento de Engenharia Florestal – UnB
Orientador

Prof. Reginaldo Sérgio Pereira
Professor do Departamento de Engenharia Florestal – UnB
Membro Interno

Prof. Dr. Marcos Antônio Pedlowski
Professor do Departamento de Geografia – UENF
Membro Externo

BRASÍLIA - DF

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada automaticamente, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

VS729e Viana de Souza, Jocemara
Extração seletiva de madeiras nativas no estado do Pará /
Jocemara Viana de Souza; orientador Eraldo Aparecido Trondoli
Matricardi. -- Brasília, 2022.
71 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Ciências Florestais)
- Universidade de Brasília, 2022.

1. Degradação Florestal. 2. Extração Seletiva. 3. Amazônia
Legal. 4. Sensoriamento Remoto. 5. Sistema de Informações
Geográficas. I. Aparecido Trondoli Matricardi, Eraldo, orient.
II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, J. V (2022). Extração seletiva de madeiras nativas no estado do Pará. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 71p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Jocemara Viana de Souza

TÍTULO: Extração seletiva de madeiras nativas no estado do Pará

GRAU: Mestre ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Jocemara Viana de Souza
joce.vianas@gmail.com

DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho a minha família,
especialmente aos meus pais Jair e Cleonice, por
todo amor e dedicação.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Eraldo Matricardi, por acreditar no meu potencial e me conceder a oportunidade de realizar essa pesquisa e conhecer um pouco mais sobre o sensoriamento remoto e geoprocessamento. Por disponibilizar parte do seu tempo para me orientar e contribuir com a execução deste trabalho, principalmente na parte de processamento e análise das imagens, saiba que foi extremamente importante e essencial para a minha formação, é muito gratificante ver a sua dedicação pela profissão. Grata pela paciência.

À Universidade de Brasília (UnB), à Coordenação e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais pelo aperfeiçoamento profissional. Aos professores que fizeram parte da minha trajetória na universidade. A secretaria de pós-graduação em Ciências Florestais.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida, resalto a importância dessa bolsa de fomento aos pesquisadores.

Ao Jorge da pós-graduação, pelo auxílio para compreender e executar um script no R.

À duas amigas queridas da pós-graduação e da vida, Yolanda e Yanara pela leitura desse trabalho, pelas boas palavras de apoio em momentos necessários.

À minha amiga Patrícia pelas boas conversas e incentivo.

À todos os amigos que me incentivaram com palavras de apoio e bons conselhos.

Aos meus pais, Jair e Cleonice por serem meu porto seguro e por sempre me incentivarem a estudar e ir em busca dos meus objetivos, as minhas irmãs Graciele e Irací, aos meus sobrinhos Joaquim e Joana, ao meu avô Martins, agradeço a compreensão durante a realização desse trabalho, e por estarem sempre ao meu lado dividindo conquistas e realizações.

Quando iniciei essa pesquisa me veio o sentimento de medo sobre o que eu estava me propondo a realizar, e chegar nesse momento depois de toda essa trajetória percorrida é muito gratificante. Por isso, a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente com a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

“...A ciência vai muito além da sua mera prática. Por trás de fórmulas complicadas, das tabelas de dados experimentais e da linguagem técnica encontra-se uma pessoa tentando transcender as barreiras imediatas da vida diária, guiada por um insaciável desejo de adquirir um nível mais profundo de conhecimento e de realização própria...”

Marcelo Gleiser

RESUMO

A extração seletiva de madeira é uma atividade econômica de grande relevância na região Amazônica, que impactou extensas áreas de florestas nativas nas últimas décadas, contribuindo para intensificar o processo de degradação das florestas tropicais. O entendimento da distribuição espacial e as tendências de expansão da extração seletiva de madeiras é essencial para o monitoramento e controle dessa atividade econômica na Amazônia brasileira. No presente estudo, analisou-se a dinâmica espacial e temporal das florestas impactadas por extração seletiva de madeiras nativas a partir de uma série temporal de dados (1992 a 2018) no estado do Pará, utilizando dados e técnicas de sensoriamento remoto. Este estudo incluiu a análise de imagens dos satélites da série *Landsat* com resolução espacial de 30 metros. O mapeamento consistiu em interpretação visual combinada com análise semiautomática utilizando o algoritmo de textura. A combinação dos dois métodos apresentou uma acurácia global acima de 90% para detecção de florestas impactadas por atividades de exploração seletiva de madeira. Foram observadas tendências significativas de crescimento das florestas exploradas seletivamente na área e período de estudo. Os resultados desta pesquisa indicam que as atividades de extração seletiva de madeira no estado do Pará alteraram a dinâmica de uso e cobertura das florestas exploradas durante o período monitorado (1992 a 2018), onde cerca de 20% do total da área explorada seletivamente foi desmatado durante o período de estudo. Quando comparados o total de florestas exploradas e o total de florestas desmatadas durante o mesmo período, observou-se que em alguns anos a área de florestas exploradas superou a área de florestas desmatadas no estado do Pará. Houve um aumento das florestas exploradas seletivamente dentro de Unidades de Conservação e Terras Indígenas, sendo que as Unidades de Conservação foram as áreas mais impactadas pela atividade madeireira, provavelmente influenciado pelos projetos de manejo florestal aprovados e autorizados pelo Serviço Florestal Brasileiro em Florestas Nacionais. A maior parte das florestas exploradas seletivamente se concentrou na região conhecida como arco do desmatamento, sendo que em anos mais recentes, as atividades de exploração seletiva migraram para as regiões de fronteira do desmatamento no estado do Pará, onde há maior abundância de matéria-prima florestal para atender a indústria madeireira.

Palavras-Chave: Amazônia Brasileira; Exploração de Madeira; Degradação Florestal; Geoprocessamento.

ABSTRACT

Selective logging is an economic activity of great relevance in the Amazon region that has impacted extensive areas of native forests in the last decades, contributing to intensify the forest degradation in the Brazilian Amazon. It is crucial to better understand the spatial distribution and trends of selective logging activities to support monitoring and controlling those economic activities of that economic activity in tropical regions. In this study, we aimed to analyze the spatial and temporal dynamics of forests impacted by selective logging of native forests based on a 26-year time series dataset (1992 to 2018) in the state of Para, using remotely sensed data and techniques. This study included the analysis of images of Landsat series satellites, at 30-meter spatial resolution. Detection and mapping selective logging were based on visual interpretation and semi-automatic technique using the texture algorithm combined. This methodological approach showed an overall accuracy greater than 90% for mapping selectively logged forests. We observed a significant increasing trend of selective logging activities in the study area and period. Our results indicate that selective logging in the state of Para affected the land use and land cover dynamics of logged forests during between 1992 and 2018, where about 20% of total selectively logged forests were deforested during the study period. By comparing the total logged forests and the total deforestation during the study period, we observed that in some years the total logged forests exceeded the total deforestation areas in the state of Para. There was an increase in selectively logged forests within Protected Areas and Indigenous Lands in which Protected Areas had been mostly impacted by logging activities, likely due to forest management projects enforced within National Forests, officially approved, and authorized by the Brazilian Forest Service. Most of selectively logged forests had been observed within the arc of deforestation in the state of Para. Recently, selective logging activities have moved towards the deforestation frontier in that State, where there is a greater abundance of forest raw materials to supply the timber industries.

Keywords: Brazilian Amazon; Selective Logging; Forest Degradation; Geoprocessing.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. Questões de pesquisa:.....	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo geral	16
2.2. Objetivos específicos.....	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
3.1. A expansão de atividades produtivas e o desmatamento na região amazônica.....	17
3.2. Comportamento histórico da produção de madeira em tora do estado do Pará	18
3.3. Desmatamento	20
3.4. Degradação	20
3.5. Extração seletiva de madeira	21
3.6. Extração seletiva convencional	22
3.7. Extração seletiva de impacto reduzido	22
3.8. Impactos ambientais da extração seletiva.....	23
3.9. Detecção e mapeamento de extração seletiva na Amazônia por satélite.....	24
3.10. Satélites e Sensores.....	26
3.10.1. Landsat	26
3.10.2. Plataforma <i>Google Earth Engine</i>	27
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
4.1. Área de estudo	29
4.2. Base de Dados	30
4.3. Processamento das imagens	32
4.4. Classificação visual de florestas impactadas por extração seletiva.....	33
4.5. Avaliação interanual de evidências de extração seletiva.....	35
4.6. Estimativas das áreas líquidas	36
4.7. Relação entre extração seletiva e desmatamento.....	36
4.8. Análise de tendência da extração seletiva de madeira.....	37
5. RESULTADOS.....	38
5.1. Estimativa das florestas impactadas por extração seletiva	38
5.2. Extração seletiva de madeira dentro áreas protegidas (UC's e TI)	41
5.3. Recorrência e persistência das atividades de extração seletiva de madeira	42
5.4. Incremento de florestas exploradas seletivamente	43

5.5. Extração seletiva de madeira e Desmatamento	44
6. DISCUSSÃO.....	45
7. CONCLUSÃO	51
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
8.1. Revisita das questões de pesquisa	53
9. REFERÊNCIAS.....	55
APÊNDICES	63
APÊNCICE A. Área de extração seletiva de madeira por ponto e órbita (1992 – 2018).....	63
APÊNCICE B. Área de extração seletiva (%) no estado do Pará nos anos de 1992 e 1996 (Grade de 225 km ²).....	64
APÊNCICE C. Área de extração seletiva (%) no estado do Pará nos anos de 1999 e 2003 (Grade de 225 km ²).....	65
APÊNCICE D. Área de extração seletiva (%) no estado do Pará nos anos de 2006 e 2010 (Grade de 225 km ²).....	66
APÊNCICE E. Área de extração seletiva (%) no estado do Pará nos anos de 2014 e 2018 (Grade de 225 km ²).....	67
APÊNCICE F. Unidades de Conservação e Terras Indígenas no estado do Pará.	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área desmatada no estado do Pará e na Amazônia legal entre 1992 e 2018.	19
Figura 2. Produção de madeira em tora (m ³) no estado do Pará e na Amazônia Legal no período de 1992 a 2018.....	20
Figura 3. Extração seletiva convencional e extração seletiva de impacto reduzido.....	23
Figura 4. Interface de Programação do <i>Google Earth Engine</i> e suas principais finalidades. ...	29
Figura 5. Mapa de localização da área de estudo (estado do Pará, Brasil).....	29
Figura 6. Pontos e órbitas das 34 cenas <i>Landsat-8</i> efetivamente utilizadas para o mapeamento das florestas exploradas seletivamente em 2018 no estado do Pará.....	31
Figura 7. Fluxograma da metodologia aplicada para detecção de áreas exploradas seletivamente.	32
Figura 8. a) Composição colorida RGB 6/4/7 (<i>Landsat-8</i>) e b) imagem textura da banda 6, cena 224/62, mostrando área de floresta explorada seletivamente no estado do Pará em 2018.....	34
Figura 9. Esquema demonstrativo da avaliação interanual de extração seletiva.....	35
Figura 10. Esquema demonstrativo da sobreposição dos polígonos de extração seletiva de madeira para estimativa das áreas líquidas.....	36
Figura 11. Esquema demonstrativo da sobreposição das áreas de extração seletiva sobre os dados de desmatamento produzidos pelo TRFIC e PRODES, para avaliar a relação entre extração seletiva de madeira e o desmatamento.	37
Figura 12. Distribuição espacial das florestas exploradas seletivamente no estado do Pará entre 1992 e 2018. A extração seletiva foi agregada em uma grade de polígono de 225 km ² e é representada como porcentagem da extensão da extração seletiva presente em cada polígono.	40
Figura 13. Área total de extração seletiva de madeira detectada dentro de Unidades de Conservação no estado do Pará entre 1992 e 2018.	41
Figura 14. Área total de extração seletiva de madeira detectada dentro de Terras Indígenas no estado do Pará entre 1992 e 2018.	42
Figura 15. Variação das taxas de florestas exploradas seletivamente e desmatadas em anos subsequentes entre 1992 e 2018, no estado do Pará.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Trabalhos realizados para detectar extração seletiva de madeira utilizando técnicas de sensoriamento remoto com sensores ópticos e suas respectivas metodologias.....	26
Tabela 2. Descrição das bandas do <i>Landsat 5 Thematic Mapper (TM)</i>	27
Tabela 3. Descrição das Bandas do <i>Landsat 8 Operational Land Imager (OLI)</i> e o <i>Thermal Infrared Sensor (TIRS)</i>	27
Tabela 4. Dados utilizados nesta pesquisa.....	31
Tabela 5. Florestas exploradas seletivamente no estado do Pará, dentro de Unidades de Conservação e Terras Indígenas entre 1992 e 2018.	38
Tabela 6. Áreas de florestas exploradas seletivamente de forma recorrente no estado do Pará em 1996, 1999, 2003, 2006, 2010, 2014 e 2018.	43
Tabela 7. Incremento anual da degradação de florestas exploradas seletivamente entre 1996 e 2018, sendo 1992 o primeiro ano da série analisada.	43
Tabela 8. Áreas de florestas exploradas seletivamente sobrepostas às áreas desmatadas detectadas pelos projetos do TRFIC e PRODES no estado do Pará, entre 1992 e 2018.....	44

LISTA DE SIGLAS

APA	-	Área de Proteção Ambiental
API	-	<i>Application Programming Interface</i>
CLAS	-	<i>Carnegie Landsat Analysis System</i>
DEGRAD	-	Mapeamento da Degradação Florestal na Amazônia Brasileira/Monitoramento da Exploração Seletiva de Madeira
DETER	-	Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real
FAO	-	Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação
FLONA	-	Floresta Nacional
GEE	-	<i>Google Earth Engine</i>
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDE	-	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
INPE	-	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Km	-	Quilômetro
LANDSAT	-	<i>Land Remote Sensing Satellite</i>
NASA	-	Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço
OLI	-	<i>Operational Land Imager</i>
PARNA	-	Parque Nacional
PRODES	-	Projeto de Monitoramento do Desmatamento da Amazônia
RGB	-	<i>Red, Green, Blue</i>
REDD+	-	Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação
RESEX	-	Reserva Extrativista
TI	-	Terras Indígenas
TIRS	-	<i>Thermal Infrared Sensor</i>
TM	-	<i>Thematic Mapper</i>
TRFIC	-	<i>Tropical Rain Forest Information Center</i>
UC's	-	Unidades de Conservação
UNFCCC	-	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima
USGS	-	<i>United States Geological Survey</i>

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a Amazônia brasileira tem passado por diferentes processos (dimensão e intensidade) de degradação florestal, tendo a extração seletiva de madeira e incêndios florestais como destaque nesses processos (ARAGÃO et al., 2008; COCHRANE; BARBER, 2009; MARENGO et al., 2018; MATRICARDI et al., 2020). A degradação refere-se a mudanças na estrutura da vegetação, ou seja, áreas com limite menor que 10% da cobertura do dossel, como consequência, reduz sua capacidade de prover bens e serviços (FAO, 2011).

A extração seletiva envolve o corte de indivíduos arbóreos de alto valor comercial (ASNER et al., 2005), inicialmente esse tipo de extração tinha como base uma ou duas espécies, como é o caso do (mogno) *Swietenia macrophylla* (VERÍSSIMO et al., 1995) e, atualmente, envolve o corte de 80 ou mais espécies (BRANCALION et al., 2018). Em contraste com o desmatamento, que é facilmente detectado por satélites, o mapeamento da extração seletiva de madeira é mais complexo, pois o corte seletivo deixa para trás um mosaico de florestas impactadas espacialmente difuso (ASNER et al., 2005) com a criação de estradas, trilhas de arraste, pátios de estocagem de madeira, e clareiras resultantes do corte de árvores (VERÍSSIMO et al., 1995; UHL et al., 1997; PINHEIRO et al., 2016).

Embora as florestas exploradas seletivamente passem por um processo menos abrupto do que a conversão de florestas em pastagem ou áreas agrícolas (BROADBENT et al., 2008), constituem efeitos ambientais negativos com impactos nos processos ecológicos, hidrológicos e climáticos (VERISSIMO et al., 1992; ASNER et al., 2009). São inúmeras as consequências da extração seletiva, como: alteração nas propriedades biofísicas da floresta (KOLTUNOV et al., 2009), mudanças no regime de luz e microclima (ASNER et al., 2002), danos ao solo (PEREIRA et al., 2002), mudanças na estrutura, composição e funcionamento da floresta (LONGO et al., 2020), perda de biomassa que ocorrem pela queda de árvores que são extraídas (GATTI et al., 2015), e aumenta a susceptibilidade da floresta ao fogo (UHL et al., 1997; COCHRANE, 1998). Também foi observado que a extração seletiva contribui para emissões e reduções de estoque de carbono em regiões tropicais (MILLER et al., 2011; GOODMAN et al., 2019; UMUNAY et al., 2019; LONGO et al., 2020).

Dada a importância dos diferentes níveis de degradação florestal como fonte de emissões de carbono, pesquisas para detectar e mapear áreas exploradas seletivamente são um componente importante no contexto internacional, já que a redução das emissões de carbono é uma das cinco estratégias da REDD+ (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação),

estabelecida durante a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC).

Recentemente, o Pará lançou a principal política pública para o Meio ambiente e Desenvolvimento Econômico Rural: O Plano Estadual Amazônia Agora, que visam esforços em direção a combater o desmatamento, redução dos gases do efeito estufa e implantar um novo modelo de reprodução econômica, social, ambiental e institucional, em bases sustentáveis (SEMAS, 2021). Globalmente, estima-se que 850 milhões de hectares de florestas tropicais foram degradados entre 1990 e 2010, sendo responsável pela emissão de 10 – 40 % de carbono (HOUGHTON et al., 2012). Baccini et al., (2017) estimaram que a degradação florestal é responsável por 69% das emissões de carbono dos ecossistemas tropicais.

Para mapear e analisar a distribuição e extensão de florestas degradadas por extração seletiva de madeira, é necessário detectar essas áreas utilizando tecnologias e dados geoespaciais (MATRICARDI et al., 2020). O sensoriamento remoto se destaca como a forma mais precisa e econômica para o mapeamento sistemático da extração seletiva em escalas espaciais amplas (HETHCOAT et al., 2019).

Estudos anteriores buscaram implementar o mapeamento da extração seletiva a partir de técnicas automáticas e semiautomática (NEPSTAD et al., 1999; ASNER et al., 2005; MATRICARDI et al., 2013; MORETTI et al., 2020). No entanto, alguns estimaram a extração seletiva a partir da produção florestal (NEPSTAD et al., 1999) e outros em que a escala espaço-temporal de pequena amplitude, muitas vezes limitados a estudos de casos. Sendo assim, a presente pesquisa consistiu em mapear e analisar de forma mais detalhada as áreas de exploração seletiva de madeira em todo o território do estado do Pará, utilizando uma ampla série temporal (1992 a 2018), produzida a partir de análises de imagens dos satélites da série *Landsat*.

1.1. Questões de pesquisa:

Em vista do exposto, o presente estudo foi norteado pelas seguintes questões de pesquisa:

1. Qual a área de florestas nativas impactadas pelas atividades de extração seletiva de madeira no estado do Pará entre 1992 e 2018? Estas áreas superaram as áreas desmatadas naquele Estado?

2. Onde estavam localizadas as florestas exploradas seletivamente na área e período de estudo? Por que ocorreram em determinados locais e não em outros? Existe algum padrão espacial?
3. Qual o destino das florestas exploradas seletivamente no estado do Pará?

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Analisar a dinâmica espacial e temporal das florestas nativas exploradas seletivamente a partir de uma série temporal de 26 anos em todo o território do estado do Pará, utilizando dados e técnicas de sensoriamento remoto.

2.2. Objetivos específicos

- i.** Identificar tendências nas áreas de florestas exploradas seletivamente no estado do Pará entre 1992 e 2018. Estas áreas superaram as áreas desmatadas naquele Estado?
- ii.** Avaliar se a extração seletiva de madeira é precursora do desmatamento na área e período estudado.
- iii.** Analisar os padrões e as mudanças espaço-temporais das florestas exploradas seletivamente na área e período de estudo.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. A expansão de atividades produtivas e o desmatamento na região amazônica

A Amazônia é uma das maiores formações de florestas tropicais do mundo, com uma área de aproximadamente 5 milhões de quilômetros quadrados coberto por floresta (FEARNSIDE; NOGUEIRA; YANAI, 2018), abrange nove países da América do Sul, sendo que 69% dessa área está inserida em território brasileiro. A Amazônia Legal é definida como uma região administrativa no Brasil, também conhecida como Amazônia Brasileira, composta pelos seguintes estados: Acre, Amazonas, Amapá, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins e região situada a oeste do meridiano 44° W do Estado do Maranhão (IBGE, 2020).

Além de ser a maior floresta tropical do mundo, a Amazônia desempenha um importante papel na manutenção da diversidade biológica, no ciclo hidrológico que contribui para regular o clima e no armazenamento de carbono (LAURANCE et al., 2001). Apesar da grande importância da floresta Amazônica na manutenção e provisão dos serviços ambientais são constantemente ameaçadas por processos de ocupação, impactos relacionados a pecuária e extração seletiva de madeira (MARGULIS, 2003; RIVERO et al., 2009).

Durante séculos a Amazônia permaneceu como fronteira econômica, demográfica e geopolítica, devido a combinações de fatores como elevados custos de transporte e de exploração econômica que implicavam em baixa lucratividade (MARGULIS, 2003). Em meados da década de 60 essa exploração ficou restrita a áreas de várzea inundadas anualmente (MATRICARDI et al., 2010). A partir da década de 70, o processo de ocupação mudou com a construção de rodovias e estradas e a dinâmica de ocupação se intensificou de forma abrupta, que favoreceu a intensificação do processo de exploração dos recursos naturais na região (UHL; VIEIRA, 1989). O desenvolvimento econômico e a expansão das atividades produtivas são um dos principais indutores do desmatamento na região amazônica (RIVERO et al., 2009).

Entre 1970 e 2000 a Amazônia registrou as maiores taxas anuais de desmatamento (NUMATA et al., 2017), para o período de 2001 – 2010 a taxa de desmatamento anual foi estimada em 16.531 km² (ANWAR; STEIN, 2012). Devido a aplicação de leis, sistemas fiscais e de monitoramento para conter o desmatamento essas taxas diminuíram, passando de quase 28.000 km² em 2004 para menos de 7.000 km² em 2011 (DAVIDSON et al., 2012). Mais recentemente, as taxas de desmatamento foram reduzidas. A taxa de desmatamento consolidada para 2018 foi de 7.536 km², esse resultado representa uma redução de aproximadamente 73% em relação aos dados registrados em 2004 (INPE, 2018).

Apesar de redução significativa nas taxas de desmatamento na Amazônia Legal a partir dos anos 2000, principalmente por conta de políticas e ações de fiscalização, milhares de quilômetros quadrados de floresta ainda são desmatados todos os anos (MARETTO et al., 2021). Segundo Fearnside, (2017), existe uma tendência geral de aumento das taxas de desmatamento na Amazônia a partir de 2012.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) tem realizado e divulgado levantamentos e taxas anuais de desmatamento e degradação na Amazônia desde 1988. O monitoramento é realizado a partir de imagens dos satélites da série *Landsat* e outros satélites, a partir de interpretação visual e classificação automática. O principal produto do INPE é o Projeto de Monitoramento do Desmatamento da Amazônia (PRODES), que produz as taxas anuais de desmatamento (INPE, 2021a). O INPE também possui um programa denominado Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real (DETER), anteriormente a degradação era monitorada por um sistema de Mapeamento da Degradação Florestal na Amazônia Brasileira/Monitoramento da Exploração Seletiva de Madeira (DEGRAD), o projeto foi descontinuado em dezembro de 2016.

3.2. Comportamento histórico da produção de madeira em tora do estado do Pará

De acordo com dados oficiais de desmatamento disponibilizados pelo INPE, entre 1992 e 2018, a Amazônia Legal teve uma área desmatada de 372.677 km². Dentre os estados que compõem a região, o Pará foi o que mais contribuiu com o desmatamento, com 126.893 km² de área desmatada, e já chegou a assumir patamares superiores a 8 mil km² em apenas um ano (INPE, 2021b). A expansão das atividades econômicas florestais, agrícola e pecuária, contribuíram com o aumento do desmatamento e das áreas de florestas exploradas seletivamente no estado do Pará (THALÊS; POCCARD-CHAPUIS; RUIVO, 2021) (Figura 1).

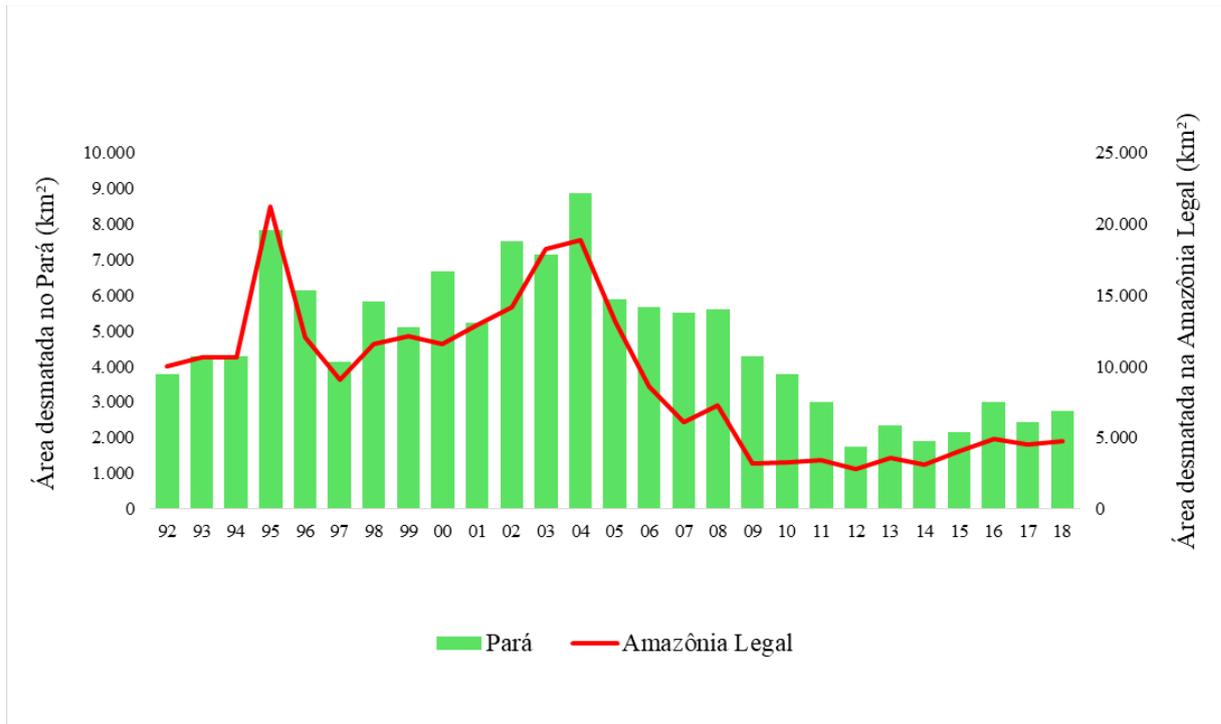


Figura 1. Área desmatada no estado do Pará e na Amazônia legal entre 1992 e 2018.

*Base de dados: Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES) (INPE, 2021b).

A exploração e processamento industrial de madeira estão entre as principais atividades econômicas da Amazônia. O Pará é o principal estado produtor de madeira do país, com uma produção anual de 6,6 milhões de metros cúbicos de madeira nativa em tora (FILGUEIRAS et al., 2017), representando 45% do total nacional produzido. O estado concentra 51% das empresas madeireiras e gera 48% dos empregos da indústria madeireira da Amazônia (LENTINI; VERÍSSIMO; PEREIRA, 2005).

O estado do Pará atingiu o pico de produção de 44,54 milhões m³ de madeira em tora em 1994 (IBGE, 2021) e desde então essa produção vem declinando. Entre 2000 e 2005 a produção média anual de madeira em tora do Pará foi de 10,5 milhões de m³. Em 2012, a produção de madeira em tora totalizou 4,87 milhões de m³, uma redução de 51% em relação a produção registrada em 2005 (Figura 2). Mesmo assim, de forma geral, a produção de madeira em tora na Amazônia Legal subiu um pouco em 2012 (13,59 milhões de m³ de madeira em tora) sendo que, os estados do Pará, Mato Grosso e Rondônia foram os maiores produtores e responderam por 88% do total produzido (VERÍSSIMO; PEREIRA, 2014).

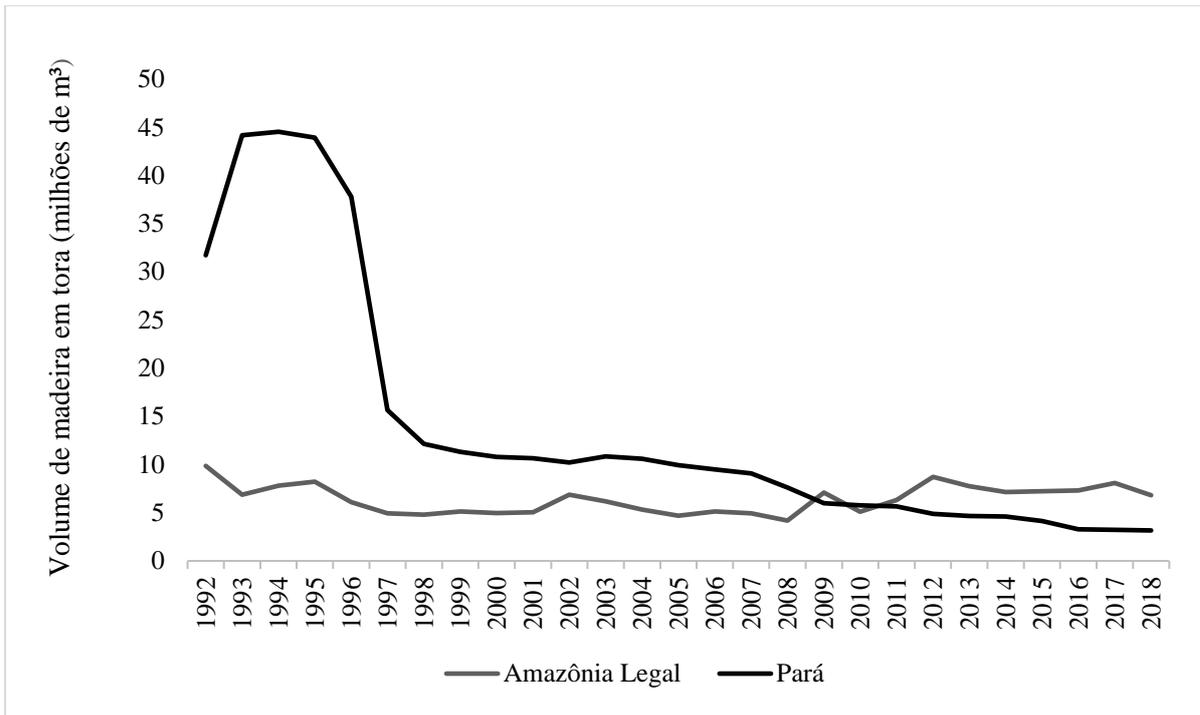


Figura 2. Produção de madeira em tora (m³) no estado do Pará e na Amazônia Legal no período de 1992 a 2018. *Base de dados: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021).

3.3. Desmatamento

Nepstad et al. (2014) define o desmatamento como corte raso de uma floresta nativa. Em geral, o processo de desmatamento ocorre por conversão direta da floresta para outros tipos de uso da terra (FEARNIDE, 2017; CARDOSO et al., 2019), independente se a cobertura florestal foi removida totalmente ou não (LUND, 1999), como também pode ser um processo gradual relacionado a atividades sucessivas, como por exemplo, atividade de exploração madeireira seguida por queimas sucessivas, que levam a alteração (degradação) do estado inicial da floresta (CARDOSO et al., 2019). O desmatamento na Amazônia Brasileira destrói serviços ambientais importantes para todo o mundo, pois causam alterações no funcionamento do ecossistema (FEARNSIDE, 2017).

3.4. Degradação

A Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO) declarou uma perda ou desmatamento de 129 milhões de hectares de florestas anuais para o período de 1990 – 2015 (FAO, 2016). Enquanto isso, a área total de florestas tropicais degradadas foi estimada em cerca de 500 milhões de hectares (ITTO, 2002). As florestas fornecem uma diversidade de serviços ecossistêmicos como, proteção do solo, regulação do regime de água,

captura e armazenamento de carbono, fornecem água doce e habitat, reduz os riscos a incêndios florestais e fornece produtos madeireiros e não madeireiros (ITTO, 2002). Portanto, a degradação florestal pode afetar até um terço da população mundial que dependem direta ou indiretamente dos recursos fornecidos pela floresta, e trata-se de uma questão ambiental global (GHAZOUL et al., 2015; FAO, 2011).

A degradação florestal pode ser definida como uma perda de atributos florestais específicos (GHAZOUL et al., 2015). A FAO, define degradação florestal como a redução da capacidade de uma floresta de fornecer bens e serviços, que podem incluir biomassa, sequestro de carbono, regulação da água, proteção do solo e conservação da biodiversidade (FAO, 2011). A degradação florestal pode variar em diferentes intensidade e abrangência, que resultam em diferentes níveis de impactos nos ecossistemas florestais (MATRICARDI et al., 2020) .

3.5. Extração seletiva de madeira

A extração seletiva de madeira é uma das atividades econômicas mais importante na região Amazônica, consiste no processo de retirada das árvores de maior valor comercial de áreas pré-determinadas. As operações de extração seletiva envolvem a derrubada de árvores, abertura de estradas, trilha de arraste, construção de pátio de estocagem (PINHEIRO et al., 2016), esse processo contribui para aumentar a degradação das florestas (VERISSIMO et al., 1992). Embora essa atividade não mate todas as árvores, ela danifica a floresta durante as operações de exploração (NEPSTAD et al., 1999; VERISSIMO et al., 1992). Os danos causados afetam a recuperação da floresta em vários graus e são muito variáveis, isso porque, a intensidade da atividade madeireira também varia muito (MATRICARDI et al., 2005; STONE; LEFEBVRE, 1998).

São muitas as variáveis que definem a intensidade da extração seletiva, como acesso a estradas, distâncias das madeiras (PUTZ et al., 2001), e importância econômica das espécies exploradas. Dependendo da intensidade da exploração a extração seletiva pode ser classificada como baixo, médio e alto impacto. As atividades de baixo impacto apresentam pequenas aberturas no dossel que são fechadas rapidamente e imitam o processo natural da dinâmica da floresta, as de médio impacto apresentam um padrão de exploração superior a anterior, as de alto impacto destroem o dossel, a extração de madeira ocorre de forma mais frequente e as áreas exploradas ficam mais susceptível a incêndios (TRITSCH et al., 2016).

3.6. Extração seletiva convencional

A extração seletiva caracterizada como convencional são operações madeireiras que ocorrem na floresta de forma não planejada e que são muito destrutivas. De acordo com Asner et al., 2009, trata-se do método mais antigo de exploração. Nesse tipo de exploração os madeireiros entram na floresta e retiram espécies de alto valor comercial e os intervalos são cada vez mais curtos para a extração dessas espécies (AMARAL et al., 1998). Mesmo essa atividade sendo considerada ilegal, ainda continua sendo umas das atividades mais praticadas na Amazônia (GREENPEACE, 1999). Por não existir planejamento e técnicas de extração adequada a extração seletiva convencional é altamente destrutiva e resulta em maiores impactos sobre as florestas (COSTA, 2017) . O resultado são florestas com grandes clareiras e árvores danificadas, tais condições aumentam a probabilidade de ocorrência de fogo (AMARAL et al., 1998) (Figura 3).

3.7. Extração seletiva de impacto reduzido

A extração de impacto reduzido está associado ao uso de princípios científicos e de engenharia em combinação com educação e treino no intuito do desenvolvimento de mão de obra especializada, equipamentos e métodos operacionais na extração de madeira (DYKSTRA, 2001). Essa técnica visa reduzir os danos à vegetação remanescente causados pela abertura de estradas, construção de pátios e extração de árvores, sendo uma alternativa à exploração convencional. (Figura 3).

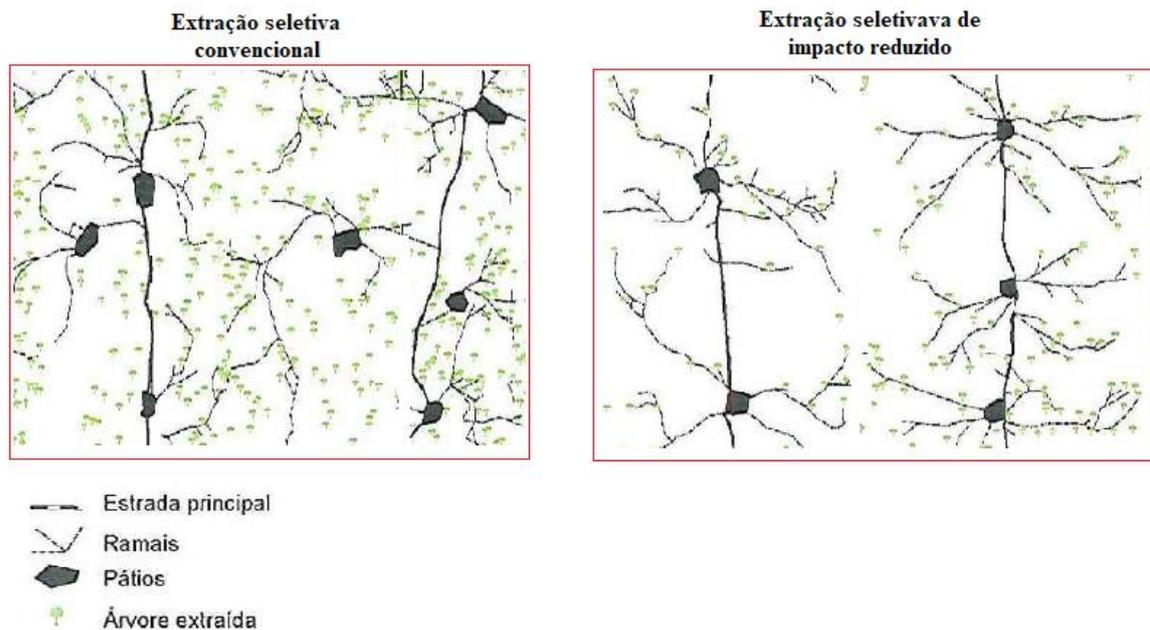


Figura 3. Extração seletiva convencional e extração seletiva de impacto reduzido.
Fonte: Adaptado (SILVA, 2004).

As atividades de extração de impacto reduzido se dividem em algumas fases sendo elas: pré-corte que incluem inventário e mapeamento das árvores a serem derrubadas; planejamento de estrada, trilha de arraste, e locais que forneçam acesso à áreas de corte, com a finalidade de minimizar alteração no solo e proteger riachos e cursos d'água; cortes de cipós das árvores que serão exploradas para melhorar a segurança no trabalho e reduzir os danos às árvores vizinhas; queda direcional de árvores para reduzir o desperdício; por último, elaborar avaliações pós-colheita para avaliar o grau em que as diretrizes desta técnica foram aplicadas (PINARD et al., 1995; DYKSTRA, 2001; PUTZ et al., 2008).

3.8. Impactos ambientais da extração seletiva

Grande parte dos impactos da extração seletiva de madeira em florestas tropicais estão diretamente associados aos efeitos das técnicas e na intensidade da extração (MARTIN et al., 2015). Embora as técnicas de extração seletiva de impacto reduzido visam minimizar os danos gerados na floresta, ainda assim, essa prática implica em algum grau de perturbação às árvores durante as operações de exploração. Isso porque a extração seletiva deixa para trás um misto de floresta intacta e floresta danificada como, brechas causadas por queda de árvores, estradas de acesso, pátios de estocagem (MATRICARDI et al., 2005, 2010, 2013).

Além disso, a extração seletiva de madeira afeta os processos ecológicos das florestas (GRECCHI ET AL, 2017), levando a perdas severas do dossel e aumento da propensão a

incêndios (UHL et al., 1997; COCHRANE, 1998), fragmentação do habitat , efeito de bordas (BROADBENT et al., 2008), danos ao solo (PEREIRA et al., 2002), redução na riqueza de espécies (MARTIN et al., 2015) e aumento das emissões de carbono (NEPSTAD et al., 1999; BRYAN et al., 2010). A principal fonte da perda de carbono é a extração de árvores de grande porte, no entanto, danos subsequentes a árvores menores que acabam sendo esmagadas ou derrubadas durante o processo de remoção de toras, danos ao redor das árvores derrubadas, também pode ser um fator que contribui para emissões de carbono (MARTIN et al., 2015; GOODMAN et al., 2019).

3.9. Detecção e mapeamento de extração seletiva na Amazônia por satélite

Vários autores têm utilizado dados de sensores ópticos para monitorar a extração seletiva de madeira na Amazônia. A interpretação visual é uma das técnicas mais utilizadas para estimar áreas de florestas afetadas por extração seletiva de madeira (PANTOJA, 2010), pois a técnica permite identificar as áreas exploradas, estradas de acesso, clareiras e pátios de estocagem (STONE; LEFEBVRE, 1998).

As técnicas para detectar áreas exploradas seletivamente incluem desde as mais simples, como interpretação visual de madeira (WATRIN; ROCHA, 1992; STONE; LEFEBVRE, 1998; SANTOS et al., 2001; MATRICARDI, 2003) e estimativas indiretas com base na produção ((NEPSTAD et al., 1999). Até técnicas automáticas utilizando análise de mistura espectral (SOUZA; BARRETO, 2000), o *Carnegie Landsat Analysis System* (CLAS) (ASNER et al., 2005), classificação semiautomática aplicando filtro textura combinados com interpretação visual (MATRICARDI et al., 2010, 2013; COSTA et al., 2019; MORETTI et al., 2020).

A detecção de áreas de extração seletiva de madeira teve início em 1992 por Watrin e Rocha, com imagens disponíveis do satélite *Landsat-5*, sensor TM, com resolução espacial de 30 metros, no ano de 1988. Os autores identificaram a presença ou ausência de pátios e vias de acesso, e adotaram esses fatores como um indicador de exploração seletiva, no entanto, a identificação da exploração de madeira foi prejudicada, pois, não definiram critérios para limitação do perímetro mapeado.

Stone; Lefebvre (1998) aplicaram técnicas de classificação supervisionada e não supervisionada e técnicas de interpretação visual de imagens do satélite *Landsat* para detectar áreas de extração seletiva de madeira em uma região de Paragominas. Os autores afirmaram que mesmo sendo possível detectar visualmente a exploração madeireira, depois de três anos

não são mais discrimináveis de floresta intacta em imagens de satélite, portanto, as imagens devem ser adquiridas em um curto período após a exploração.

Janeczek (1999) testou o algoritmo textura para detectar áreas exploradas seletivamente na Amazônia brasileira em 1992 utilizando imagens *Landsat*. A autora utilizou uma análise de textura automatizada com a banda 5 para identificação de pátios e estradas, e sugere que essas técnicas podem ser aprimoradas integrando-as com imagens de satélite de alta resolução.

Souza; Barreto (2000) desenvolveram um método para detectar áreas de extração seletiva utilizando a fração solo do modelo linear de mistura espectral, e aplicaram um zonas (*buffers*) de 180 metros em torno dos pátios de estocagem para estimar extração seletiva de madeira no estado do Pará.

Santos et al., (2001) utilizaram imagens do satélite *Landsat* para identificação de locais de extração seletiva de madeira em áreas de floresta de terra firme, e estimaram a taxa anual desse processo. Os autores mapearam extração seletiva na Amazônia no período de 1988 a 1998 e encontraram uma área de 17.146 km² com padrões de exploração seletiva, correspondendo a uma média anual de 1.580 km² de florestas exploradas.

Asner et al., (2002) conduziram um estudo no estado do Pará, onde combinaram um trabalho de campo de danos no dossel da floresta com dados de refletância e análise de textura para avaliar a extração seletiva. Os autores concluíram que, embora a análise textura possa ser útil para um amplo delineamento de florestas exploradas, essa técnica não pode avaliar a intensidade dos danos ao dossel.

Matricardi (2003) para estimar e quantificar áreas exploradas na Amazônia aplicou a distância de *buffers* de 180 metros estimada por (SOUZA; BARRETO, 2000) . Outros autores também utilizaram imagens *Landsat* para mapear áreas de extração seletiva de madeira na Amazônia, usando métodos semiautomáticos com base na interpretação visual, aplicação de *buffers* e filtro textura (MATRICARDI, 2003; MATRICARDI et al., 2005, 2010, 2013, 2020; COSTA, 2017; MORETTI et al., 2020).

Técnicas para detectar áreas exploradas seletivamente também foram testadas por Asner et al., (2005). Os autores conduziram uma análise plurianual da extração seletiva de madeira em cinco estados na Amazônia brasileira no período de 1999 a 2002. Asner et al., (2005) utilizaram imagens do *Landsat-7* e desenvolveram o CLAS. A partir dessa metodologia os autores mapearam a extração seletiva de madeira.

A Tabela 1 sintetiza alguns trabalhos realizados na Amazônia que envolvem a extração seletiva de madeira, esses estudos mostraram a viabilidade de utilizar imagens de satélite *Landsat* no monitoramento de atividades de exploração madeireira.

Tabela 1. Trabalhos realizados para detectar extração seletiva de madeira utilizando técnicas de sensoriamento remoto com sensores ópticos e suas respectivas metodologias.

Autores	Ano	Descrição
Watrin e Rocha	1992	Mensuração de área de florestas degradadas por interpretação visual
Stone e Lefebvre	1998	Interpretação visual
Janeczek	1999	Interpretação visual
Nepstad et al.	1999	Estimativa indireta com base na produção de madeira
Souza e Barreto	2000	Análise de mistura espectral
Santos et al.	2001	Interpretação visual
Asner et al.	2002	Análise de textura para avaliar danos ao solo e ao dossel
Matricardi	2003	Interpretação visual
Souza et al.	2003	Análise de mistura espectral com imagem fração e árvore de decisão
Asner et al.	2005	Método automático utilizando mistura espectral
Matricardi et al.	2005	Técnica semiautomática e revisão por interpretação visual
Matricardi et al.	2007	Mapeamento de florestas degradadas por interpretação visual e técnicas semiautomáticas
INPE	2010	Detecção de extração seletiva de madeira
Matricardi et al.	2010	Extensão e impactos da extração seletiva de madeira e dos incêndios florestais
Matricardi et al.	2013	Técnicas semiautomáticas utilizando mistura espectral
Tritsch et al.	2016	Perturbação florestal e forma de exploração florestal
Costa et al.	2019	Técnicas semiautomáticas e inspeção visual
Moretti et al.	2020	Classificação semiautomática e interpretação visual
Matricardi et al.	2020	Técnicas semiautomática e interpretação visual

3.10. Satélites e Sensores

3.10.1. *Landsat*

A série *Landsat* constituem os mais longos e complexo registro temporal de observações da superfície baseadas no espaço. Desde 1972, os satélites têm adquirido imagens das superfícies continentais do planeta terra a partir do espaço, fornecendo dados que servem como recursos valiosos para pesquisas sobre mudanças no uso da Terra (USGS, 2018).

O *Landsat* 1 foi lançado em 1972 e seguido por uma série de observatório *Landsat* consecutivos 2, 3 e 4, sendo que o *Landsat* 4 foi lançado em 1982 e desativado em 1993 (ROY et al., 2014; USGS, 2018). A série do *Landsat* 5 sensor *Thematic Mapper* (TM) foi lançando

em 1984 e forneceu imagens da Terra por quase 29 anos, foi um dos satélites que ficou ativo por mais tempo, suas atividades foram encerradas em 2013. A Tabela 2 apresenta as características desse sensor (Tabela 2).

Tabela 2. Descrição das bandas do *Landsat 5 Thematic Mapper (TM)*.

Bandas	Resolução espectral (μm)	Resolução espacial
Banda 1 - azul	0,45-0,52	30 m
Banda 2 -verde	0,52-0,60	30 m
Banda 3 –vermelho (RED)	0,63-0,69	30 m
Banda 4 – infravermelho próximo (NIR)	0,76-0,90	30 m
Banda 5 – infravermelho médio (SWIR)	1,55-1,75	30 m
Banda 6 – infravermelho termal (TIR)	10,40-12,50	120 m
Banda 7 – infravermelho médio (SWIR)	2,08-2,35	30 m

No ano de 2013 foi lançado o *Landsat 8*, o satélite carrega uma carga útil de dois sensores, o *Operational Land Imager (OLI)* e o *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*. O sensor OLI tem duas bandas de comprimento de ondas reflexivas adicionais: uma banda azul de comprimento mais curto, uma banda de infravermelho de ondas curtas, emprega uma tecnologia que permite a aquisição de dados com um desempenho sinal ruído muito melhor e resolução radiométrica mais alta (ROY et al., 2014; KE et al., 2015). A seguir são apresentadas as especificações das bandas espectrais dos sensores OLI e TIRS (Tabela 3).

Tabela 3. Descrição das Bandas do *Landsat 8 Operational Land Imager (OLI)* e o *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*.

Sensor	Bandas	Resolução espectral	Resolução espacial
OLI (<i>Operational Land imager</i>)	Banda 1 - azul	0,43-0,45	30 m
	Banda 2 - azul	0,45-0,51	30 m
	Banda 3 - verde	0,53-0,59	30 m
	Banda 4 – vermelho (RED)	0,64-0,67	30 m
	Banda 5 - infravermelho próximo (NIR)	0,85-0,88	30 m
	Banda 6 - infravermelho médio (SWIR-1)	1,57-1,65	30 m
	Banda 7 - infravermelho médio (SWIR-2)	2,11-2,29	30 m
	Banda 8 - pancromática	0,50-0,68	15 m
	Banda 9 - cirrus	1,36-1,38	30 m
	Banda 10 - infravermelho termal	10,60-11,19	100 m
TIRS (<i>Termal Infrared Sensor</i>)	Banda 11 - infravermelho termal	11,50-12,51	100 m

3.10.2. Plataforma *Google Earth Engine*

O *Google Earth Engine (GEE)* é uma plataforma computacional que pertence a GoogleTM, combina um catálogo de vários petabytes de imagens de satélites e conjunto de dados geoespaciais com capacidade de análise em escala planetária. A plataforma *Earth Engine* foi

projetada para ajudar os pesquisadores a divulgar facilmente seus resultados para outros pesquisadores, cientistas, trabalhadores do campo e outros usuários (GEE, 2019).

O GEE é uma plataforma on-line de monitoramento de dados ambientais que inclui dados da Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA) e do programa *Landsat*, fornece recurso de análise em mais de 40 anos de imagens de satélite cobrindo todo o globo terrestre. Em 2008 quando *United States Geological Survey* (USGS) disponibilizou o acesso aos seus registros de imagens do *Landsat*, o Google viu uma oportunidade de usar seus recursos de computação em nuvem para viabilizar o acesso e o processamento das imagens *Landsat* em seu sistema on-line (PATEL et al., 2015). Isso permitiu uma redução no tempo de processamento nas análises de imagens do *Landsat* e tornou os projetos mais viáveis em escala global (HANSEN et al., 2013).

O GEE pode ser acessado usando a ferramenta *browser*, que funciona como uma interface para a aplicação de programação *Application Programming Interface* (API), acessível à internet com base em um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), que permite a criação de protótipos e a visualização rápida dos resultados. O processamento dos dados é realizado através de *scripts* por meio da interface integrada (API) que recorre as linguagens de programação de *JavaScripts* e *Python*. Todos os dados são pré-processados e disponibilizados a pronto uso, de forma a permitir acesso eficiente e remover barreiras associadas ao gerenciamento de dados (GORELICK et al., 2017). A Figura 4 apresenta uma interface do GEE e a descrição dos itens presentes no *Code Editor*.

As principais aplicações atuais do *Google Earth Engine* incluem o monitoramento de perda e ganho da cobertura florestal da superfície terrestre, a detecção de desmatamento, a classificação da cobertura da terra, e as estimativas de biomassa florestal e carbono entre outras aplicações. A Figura 4 apresenta uma descrição dos itens presentes no *Code Editor* do GEE, onde os usuários podem desenvolver seus próprios scripts ou utilizar scripts já disponíveis na plataforma e fazer as adaptações necessárias para as regiões de interesse.



Figura 4. Interface de Programação do *Google Earth Engine* e suas principais finalidades.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

A área do presente estudo compreende todo o território do estado do Pará (Figura 5), localizado na região norte do país. O Pará faz parte da região definida como Amazônia Legal pela lei 12.651/2012 (BRASIL, 2012). É o segundo maior território da federação e abrange grande parte da Amazônia com uma área equivalente a 14,7% do território nacional (VENTURIERI; NASCIMENTO JR; OLIVEIRA JR, 2019). O estado possui aproximadamente 1,2 milhões de km² de área territorial, dividido em 144 municípios (IBGE, 2020), com 69% do território coberto por florestas tropicais.

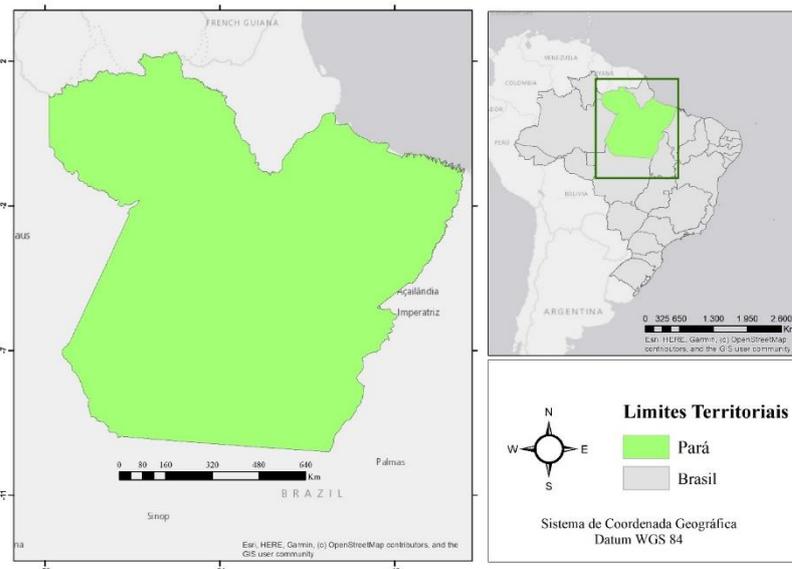


Figura 5. Mapa de localização da área de estudo (estado do Pará, Brasil).

O estado do Pará está inserido na Bacia Amazônica, que apresenta cobertura vegetal com formação diversificada, que incluem floresta de terra firme, várzea, igapó, manguezais, campos de várzea, campos de terra firme, campinas, vegetação serrana e vegetação de restinga (BRAGA, 1979).

Com relação aos aspectos climáticos, a região Amazônica é caracterizada por apresentar clima quente e úmido durante todo o ano e a precipitação é o parâmetro com maior heterogeneidade e variabilidade espaço temporal (LOUREIRO et al., 2014). A sazonalidade no Estado do Pará é caracterizada por uma estação chuvosa que compreende os meses de dezembro a maio, e estação seca que corresponde aos meses de junho a novembro (MORAES et al., 2005).

De acordo com as normas climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia, a temperatura média anual apresenta pequena variação sazonal com médias acima de 25°C em todos os meses do ano (INMET, 1992). Sendo variável ao longo do ano, com menores temperaturas em fevereiro, estação chuvosa, e temperaturas mais elevadas no mês de outubro, transição entre o fim do período menos chuvoso e início do período mais chuvoso (MORAES et al., 2005).

As principais classes de solos predominante no estado do Pará são Latossolos e Argissolos. A classe Latossolos é definida como solos profundo altamente intemperizados, com textura que varia de média a muito argilosa, característicos de regiões equatoriais e tropicais, com relevo levemente ondulado e plano. A classe dos Argissolos apresentam maior teor de argila nos horizontes subsuperficiais, e podem ser encontrados em diversas condições de clima e relevo, são solos caracterizados por altos níveis de acidez e baixa fertilidade (EMBRAPA, 2018).

O relevo do estado do Pará é predominantemente baixo e plano, com aproximadamente 60% do território abaixo dos 200 metros. As altitudes superiores a 500 metros estão nas serras dos Carajás, do Cachimbo e do Acari. Destaca-se pela sua extensa rede hidrográfica, distribuídas em quatro principais bacias do rio Amazonas, Tapajós, Tocantins e rio Xingu (GOVERNO DO PARÁ, 2022).

4.2. Base de Dados

O conjunto de dados utilizados no presente estudo foram disponibilizados por Matricardi et al. (2013) e Costa et al. (2019) contendo áreas de florestas impactadas por atividades de extração seletiva de madeira nos anos de 1992, 1996 e 1999 e para os anos de 2003, 2006, 2010 e 2014, respectivamente. No presente estudo, acrescentou-se o mapeamento

das florestas exploradas seletivamente em 2018, implementado a partir de análises de 34 cenas do satélite *Landsat - 8* (OLI) adquiridas entre julho a dezembro de 2018, selecionando àquelas com menor quantidade de nuvens no período (Figura 6). As imagens foram acessadas e obtidas na base de dados da plataforma *Google Earth Engine* (GEE), disponível no endereço: (<https://earthengine.google.com>).

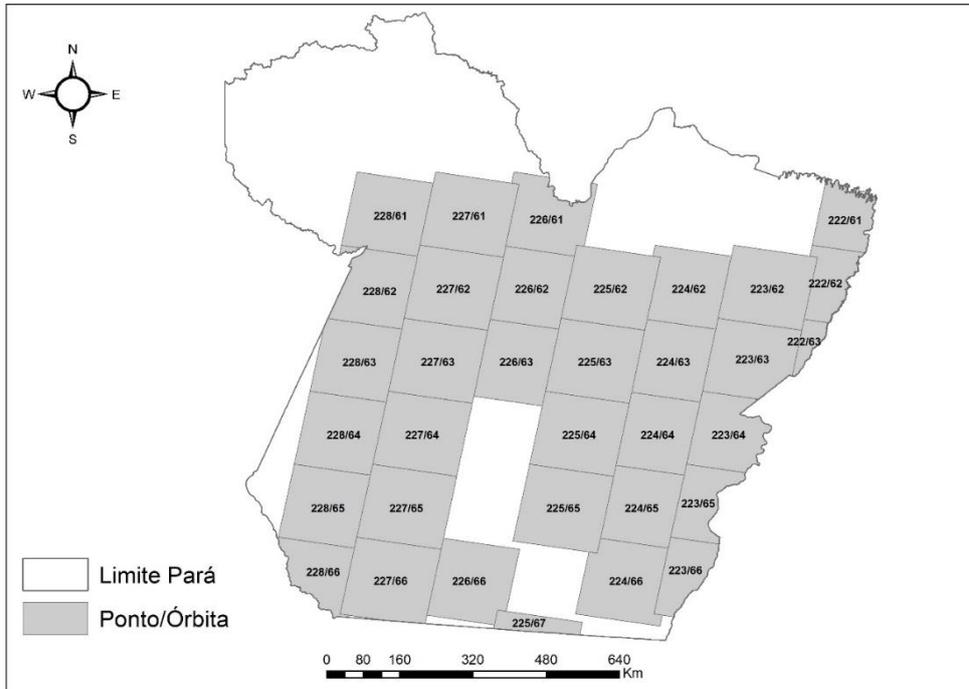


Figura 6. Pontos e órbitas das 34 cenas *Landsat-8* efetivamente utilizadas para o mapeamento das florestas exploradas seletivamente em 2018 no estado do Pará.

Os limites das Unidades de Conservação e Terras Indígenas foram obtidos no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. As características do conjunto de dados utilizados contendo feição, formato e resolução são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Dados utilizados nesta pesquisa.

Dados	Feição	Formato	Resolução	Projeção	Referências
Imagem <i>Landsat</i>	raster	.tiff	30 m	WGS 84	GEE (2017, 2018)
Grade <i>Landsat</i> Ponto e Órbita	polígonos	.shp	-	WGS 84	-
Limite do Pará	polígono	.shp	-	WGS 84	-
Unidade de Conservação	polígonos	.shp	-	WGS 84	IBGE (2016)
Terra indígena	polígonos	.shp	-	WGS 84	IBGE (2016)
Desmatamento	polígonos	.shp	-	WGS 84	INPE (2018)
Degradação 1992, 1996 e 1999	raster	.tiff	30 m	Sinusoidal	MATRICARDI (1992, 1996, 1999)
Degradação 2003, 2006, 2010 e 2014	raster	.tiff	30 m	Sinusoidal	COSTA (2003, 2006, 2010 e 2014)

4.3. Processamento das imagens

O processamento das imagens foi conduzido na plataforma GEE para o mapeamento das florestas exploradas seletivamente em 2018, com base em computação em nuvem para análise de dados. Também se utilizou o Google Drive como plataforma de armazenamento em nuvem das imagens processadas. No estudo foram utilizadas a coleção de imagens *Landsat-8* do sensor OLI, com refletância de superfície, isto é, já corrigidas do efeito da atmosfera, e devidamente georreferenciadas (Figura 7).

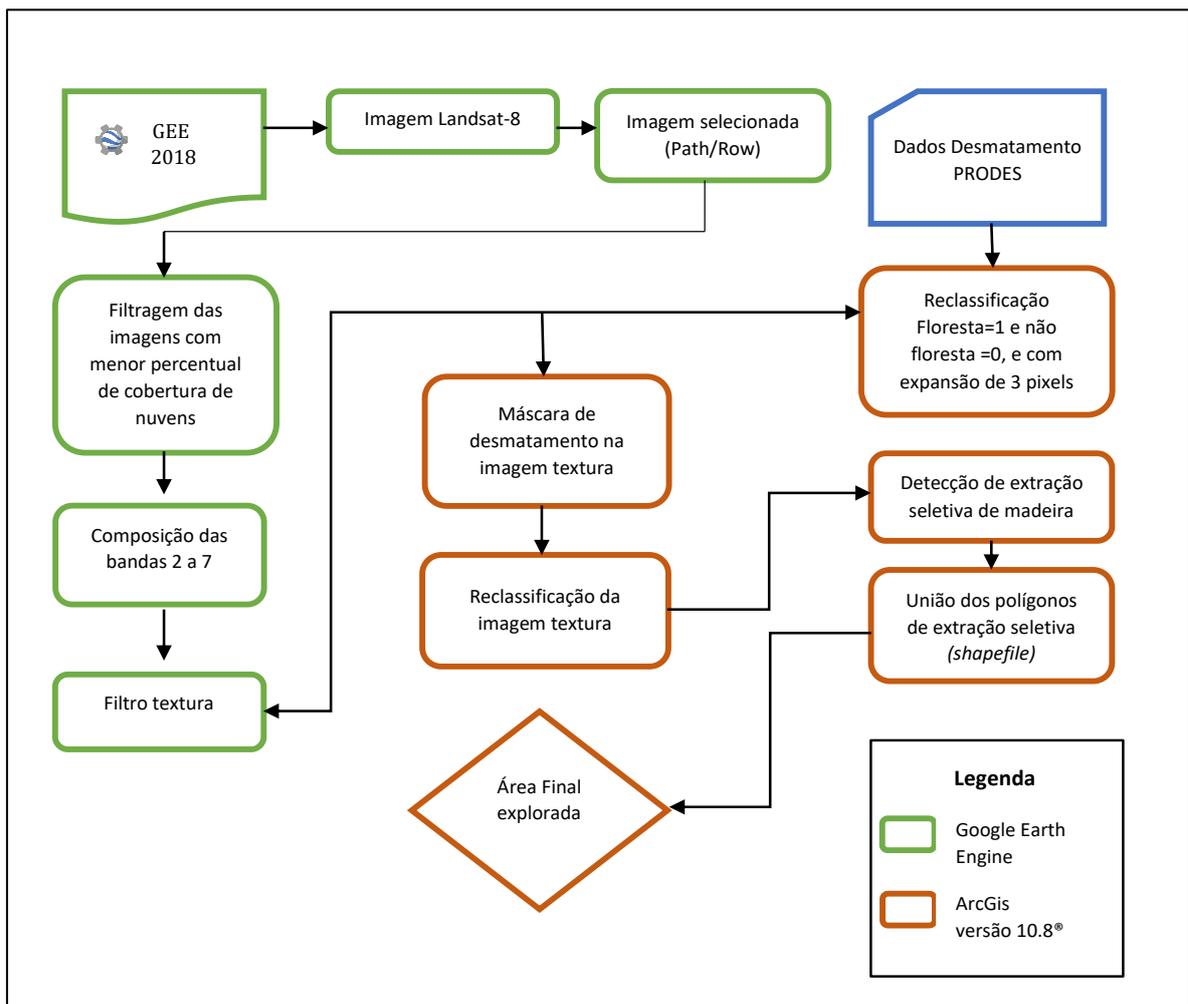


Figura 7. Fluxograma da metodologia aplicada para detecção de áreas exploradas seletivamente.

As imagens foram selecionadas a partir de cada ponto (*Row*) e órbita (*Path*) na plataforma *Google Earth Engine*. Utilizou-se também uma função que retorna as imagens com menor percentual de cobertura de nuvens dentro do período selecionado: `filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 8))`.

A partir da coleção de imagens para o período analisado foi possível fazer a composição de imagens bandas 2 a 7 e produzir uma imagem textura para cada imagem multiespectral. Para estimar a textura utilizou-se uma janela de 5 x 5 pixels na banda 6 no canal do infravermelho médio. O filtro textura forneceu uma melhor taxa de detecção dos pátios de estocagem, a técnica segmenta uma imagem e classifica os segmentos, fornecendo bordas mais nítidas (MATRICARDI et al., 2005). As imagens foram exportadas para o Google Drive utilizando funções específicas, a exportação é feita pelo comando: *Export.image.toDrive* ({}).

Após o processamento das imagens foi utilizado o *software* ArcGIS versão 10.8®, licenciado para o uso na Universidade de Brasília, para a interpretação visual das áreas de extração seletiva, confecção dos mapas, como para extração dos dados que subsidiaram os resultados da pesquisa.

4.4. Classificação visual de florestas impactadas por extração seletiva

Os dados de desmatamento para os anos de 1992, 1996 e 1999 foram obtidos do *Tropical Rain Forest Information Center* (TRFIC) e para os anos de 2003, 2006, 2010, 2014 e 2018, foram adquiridos na plataforma TerraBrasilis, desenvolvida pelo INPE, que disponibilizam dados de monitoramento da vegetação nativa através do PRODES. Os dados de desmatamento foram reclassificados em floresta e não floresta, que incluiu as classes: desmatamento, corpo d'água, nuvens e resíduo. A reclassificação consistiu em produzir uma imagem binária, com duas classes, sendo: 0 = não floresta, 1 = floresta. A imagem binária reclassificada foi utilizada como máscara para produção de imagens multiespectrais apenas em áreas florestais, com expansão de três pixels sobre as áreas de florestas, para remoção do efeito borda.

Para identificar as áreas de extração seletiva foram interpretadas visualmente e analisadas de forma semiautomática (filtro textura) as imagens multiespectrais das áreas de florestas na área de estudo, excluindo (máscara) as áreas de não floresta. A imagem textura se refere à variação espacial de tons de cinza em uma imagem (HARALICK; DINSTEIN; SHANMUGAM, 1973). O uso de imagens com filtro textura pode ser aplicado para estimar biomassa florestal (KELSEY; NEFF, 2014); predição de cultura agrícola (YUAN et al., 2019); degradação florestal (MATRICARDI et al., 2007; MORETTI et al., 2020), entre outras aplicações. Embora existam várias técnicas de análise de textura, o uso da matriz de co-ocorrência de nível de cinza (GLCM) é o método mais utilizado para o filtro textura (MENESES et al., 2012).

Para a análise de textura pelo filtro de co-ocorrência, utilizou-se um conjunto de medidas estatísticas locais para representar uma imagem texturizada, que incluíram a média, variância, homogeneidade, contraste, segundo momento, correlação e outras. Cada uma dessas medidas é uma tentativa de calcular feições texturais da imagem com base em propriedades da matriz de co-ocorrência (MENESES et al., 2012).

As florestas exploradas visivelmente detectáveis nas imagens *Landsat-8*, foram digitalizadas manualmente utilizando as imagens textura em conjunto com as cenas *Landsat-8*, usando a composição (RGB) das faixas espectrais Infravermelho Médio (SWIR-1), vermelho (Red), Infravermelho Distante (SWIR-2). A combinação dessas bandas realçou os pátios e estradas de extração seletiva, que são perfeitamente visíveis na imagem. As florestas exploradas seletivamente normalmente apresentam áreas de pátios de estocagem e clareiras de quedas de árvores com um padrão característicos como pontos brancos, enquanto as estradas de acesso aparecem como segmentos em cor branca conectando os pátios de estocagem (Figura 8). Florestas que não apresentaram distúrbio visíveis do dossel não foram digitalizadas.

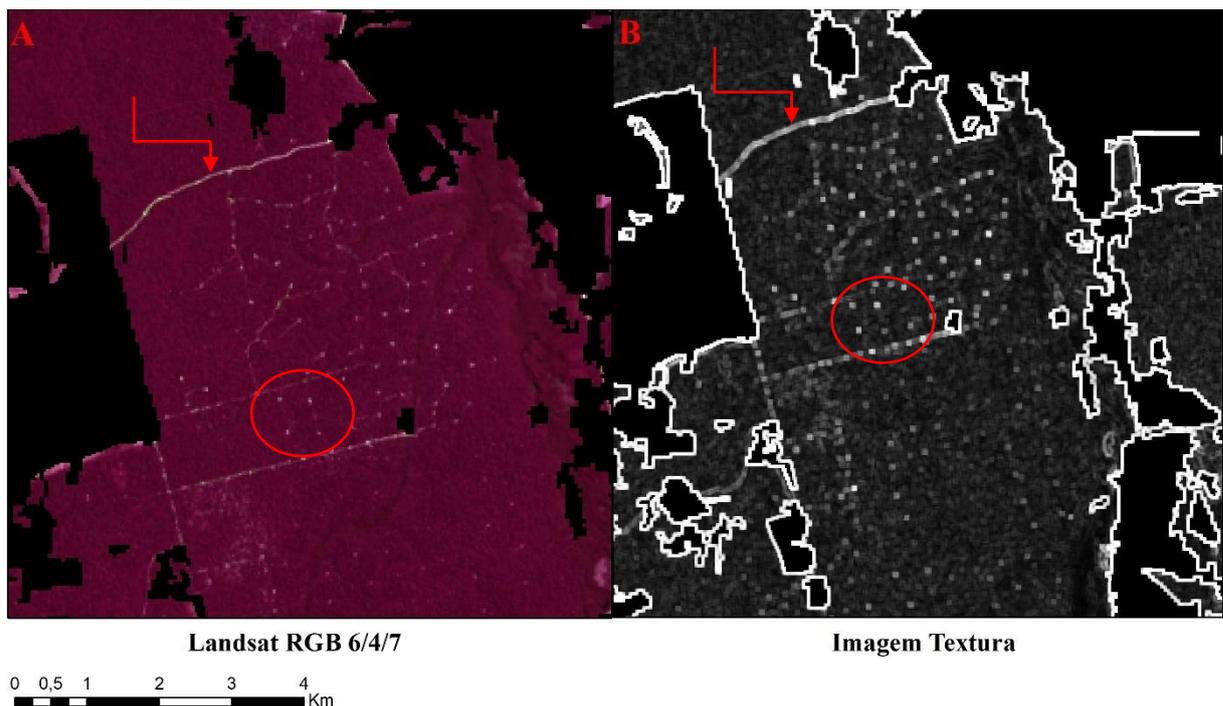


Figura 8. a) Composição colorida RGB 6/4/7 (*Landsat-8*) e b) imagem textura da banda 6, cena 224/62, mostrando área de floresta explorada seletivamente no estado do Pará em 2018.

Após a identificação dos pátios de estocagem, foram construídos *buffers* de 180 metros entorno dos pátios para identificar e estimar áreas afetadas por extração seletiva. Esse valor foi estipulado em campo por (MATRICARDI et al., 2007). A extração seletiva digitalizada

manualmente e o filtro textura foram unidos em um mapa vetorial (*shapefile*) e transformados para *raster*. Ao final do processamento os dados foram projetados para a projeção Sinusoidal. A combinação das duas técnicas (interpretação visual e textura) apresentou uma acurácia global de 92.9% (MATRICARDI et al., 2007).

Para facilitar a visualização da extração seletiva de madeira no estado do Pará, elaborou-se uma grade de polígonos de 225 km² de área. Para isso, foi calculada a porcentagem da extensão de áreas de florestas exploradas seletivamente presentes em cada polígono da grade construída.

4.5. Avaliação interanual de evidências de extração seletiva

Os dados de extração seletiva (período de 1992 a 2018) foram sobrepostos aos dados contendo os limites das Unidades de Conservação e Terras Indígenas com o objetivo de quantificar evidências de extração seletiva de madeira no interior dessas áreas.

Além disso, as áreas de extração seletiva de madeiras detectadas em um ano foram sobrepostas aos anos seguintes para verificar a persistência/recorrência dessas áreas em anos subsequentes ou se foram desmatadas. O ano de 1992 foi o ponto de partida, sendo subsequentemente sobreposto com a extração seletiva de 1996, 1999, 2003, 2006, 2010, 2014 e 2018. Do mesmo modo, as camadas de extração seletiva do ano de 1996 foram sobrepostas aos anos seguintes. O mesmo procedimento foi realizado em todos os anos em que ocorreram extração seletiva de madeira. Ao todo foram 28 sobreposições de áreas de extração seletiva (Figura 9).

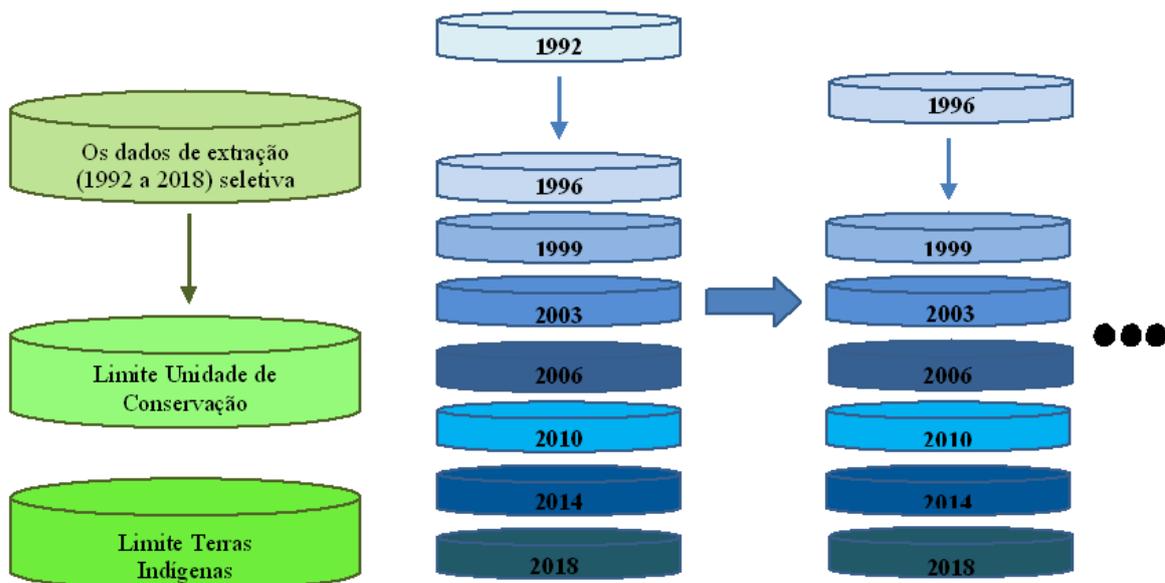


Figura 9. Esquema demonstrativo da avaliação interanual de extração seletiva.

4.6. Estimativas das áreas líquidas

A partir das sobreposições dos polígonos de extração seletiva de madeira, foi estimado o incremento líquido das florestas exploradas.

As áreas sobrepostas não foram contabilizadas duas vezes, pois foram excluídas as intersecções de polígonos, e as áreas não sobrepostas foram consideradas novas áreas de extração. O ano 1992 foi o primeiro ano de análise, sendo assim, nenhum incremento é fornecido nesse período (Figura 10). Esse procedimento de sobreposição das áreas foi realizado sequencialmente para todos os anos de análises (1992 a 2018).

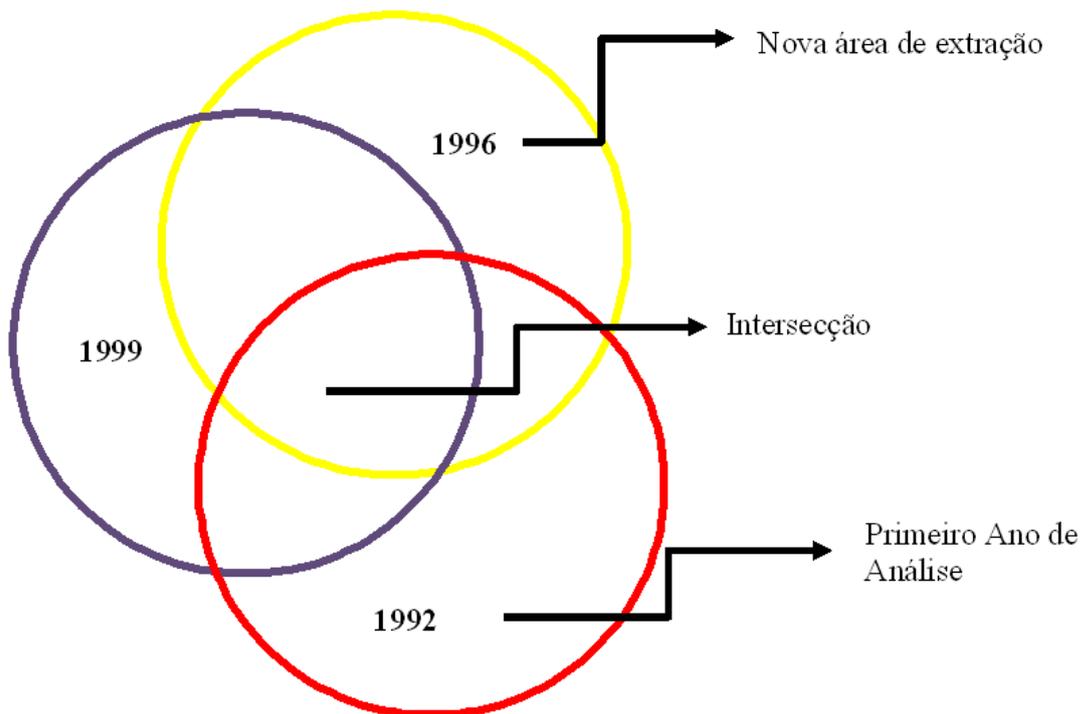


Figura 10. Esquema demonstrativo da sobreposição dos polígonos de extração seletiva de madeira para estimativa das áreas líquidas.

4.7. Relação entre extração seletiva e desmatamento

As áreas de extração seletiva foram sobrepostas aos dados de desmatamento produzidos pelo TRFIC e pelo PRODES para os anos de 1992, 1996, 1999, e para os anos de 2003, 2006, 2010, 2014 e 2018, respectivamente. Essas sobreposições foram utilizadas para avaliar os impactos das atividades de extração seletiva. A pesquisa não avaliou se a extração seletiva ocorrida em 2018 foi desmatada no ano subsequente, considerando que o período de análise foi entre 1992 e 2018 (Figura 11).

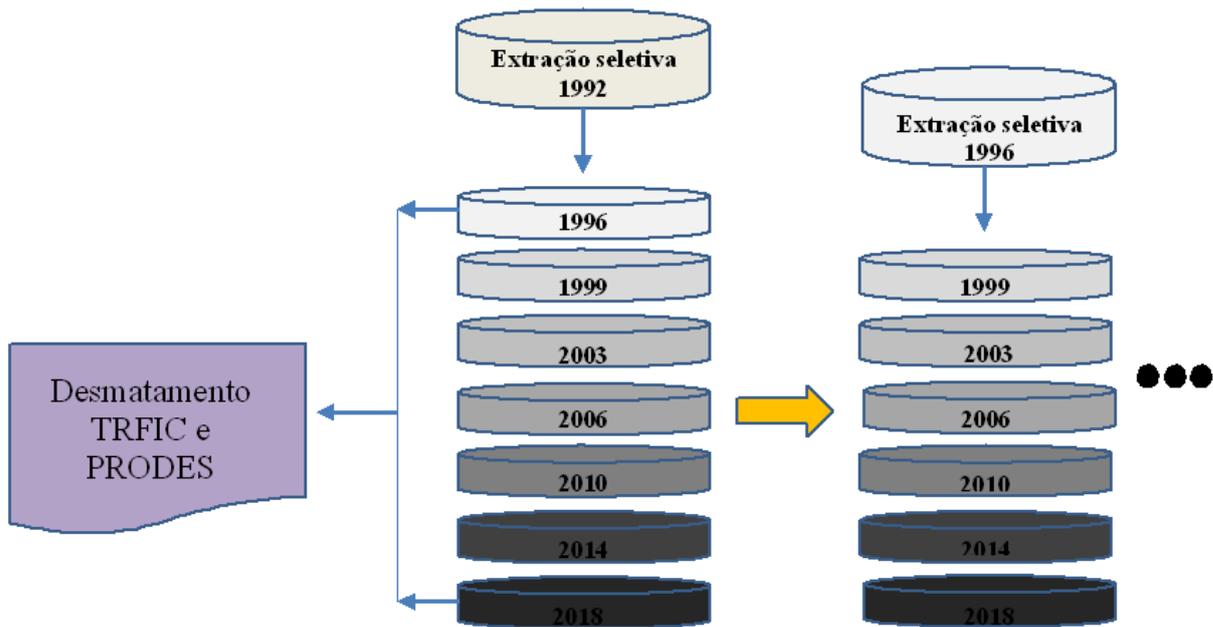


Figura 11. Esquema demonstrativo da sobreposição das áreas de extração seletiva sobre os dados de desmatamento produzidos pelo TRFIC e PRODES, para avaliar a relação entre extração seletiva de madeira e o desmatamento.

4.8. Análise de tendência da extração seletiva de madeira

Para verificar a existência de alguma tendência nos dados de florestas exploradas seletivamente, foi aplicado o teste de Cox-Stuart utilizando o *software* R, o pacote *randtest* e o comando *cox.stuart.test()*, ao nível de 5% de significância. O teste é uma estatística não paramétrica, ou seja, o modelo não especifica a distribuição da população da qual provém a amostra.

O teste de Cox-Stuart é utilizado para verificar a existência de tendência em séries temporais e foi desenvolvido por Cox e Stuart (1955), e aplicado em estudos de análise de séries temporais de Morettin e Toloí (2006). O teste de Cox-Stuart ou teste do sinal consiste em agrupar as observações em pares, onde calcula-se as diferenças associando os sinais “-” para valores negativos e “+” para valores positivos. Segundo Teixeira-Gandra et al., (2014), uma amostra sem tendência apresenta o mesmo número de sinal negativo e sinal positivo, e é considerado estatisticamente semelhante, ao mesmo nível de significância. As hipóteses testadas foram:

H_0 : Não existe tendência (os números de sinais positivos e negativos são iguais);

H_1 : Existe tendência (os números de sinais positivos e negativos são diferentes).

5. RESULTADOS

Inicialmente, estão apresentados em tabelas e figuras os dados das florestas exploradas seletivamente no estado do Pará entre 1992 e 2018, usando técnicas de interpretação visual e análise semiautomática de imagens *Landsat*. A partir das sobreposições dos polígonos de extração seletiva de madeira, foram feitas as estimativas de florestas exploradas seletivamente dentro de Unidade de Conservação e Terras Indígenas, áreas persistentes ou recorrentes no período estudado, estimativas do incremento de florestas exploradas e áreas de extração seletiva que foram desmatadas após exploração florestal.

5.1. Estimativa das florestas impactadas por extração seletiva

A partir dos dados deste estudo, estima-se que uma área total 2.409, 5.093 e 10.851 km² de florestas foram exploradas seletivamente em 1992, 1996 e 1999, respectivamente no estado do Pará. Entre 2003 e 2006 houve um aumento de aproximadamente 490 km². Em 2003, observou-se a maior área de florestas impactada por atividades de extração seletiva de madeiras no período e área de estudo, um total de 15.931,3 km² (Tabela 5), enquanto que em 2010, 2014 e 2018, observou-se uma redução no total das áreas de florestas exploradas seletivamente. A mesma redução foi observada por COSTA (2017) em um estudo conduzido para toda a Amazônia Legal entre 1992 e 2014. A média de extração seletiva analisada entre 1992 e 2018 foi de aproximadamente 10.462 km².

Tabela 5. Florestas exploradas seletivamente no estado do Pará, dentro de Unidades de Conservação e Terras Indígenas entre 1992 e 2018.

	1992	1996	1999	2003	2006	2010	2014	2018
Total*	2409,0	5093,0	10851,1	15931,3	15441,7	13139,1	10760,3	10069,3
UC's	2,33	1,32	53,40	730,26	570,20	391,54	428,30	584,55
TI	9,09	3,50	180,25	226,78	466,87	344,50	486,55	717,46

*Total de áreas exploradas seletivamente no estado do Pará; UC's = Unidades de Conservação; TI = Terras Indígenas.

Para verificar potenciais tendências nas variações anuais das áreas de florestas alteradas por extração seletiva de madeira, aplicou-se o teste de Cox-Stuart (Tabela 5). O resultado deste teste foi a estatística $p\text{-value} = 0,625$, que é superior a 0,05 em um intervalo de confiança de 95%. Portanto, não houve evidências para rejeitar a hipótese nula, ou seja, não foi verificado tendências de redução ou de crescimento nos dados de extração seletiva de madeira no estado do Pará. A hipótese nula não pode ser rejeitada pois não existe tendência nos dados avaliados.

Em análise focando os pontos e órbitas das imagens *Landsat*, observou-se que um total de 23.244,8 km² e 17.056,7 km² foram detectados entre 1992 e 2018 nas cenas 223/62 e 223/63, respectivamente, as maiores áreas detectadas no período de estudo, localizadas na parte

Nordeste do estado do Pará. A cena 223/62 apresentou a maior área de extração seletiva no ano de 2010 (4.832,2 km²). No ano de 1992 a cena 224/62 tinha uma área explorada de 20,8 km², passando para 2.273,7 km² em 2003. Isto indica a alteração na dinâmica espacial da atividade madeireira, migrando em anos mais recentes para a parte Oeste e Sudoeste daquele Estado. No apêndice A encontram-se os resultados da extração seletiva dentro de cada ponto e órbita para os anos de 1992 a 2018.

A partir destas análises, foram construídos mapas que mostram a extensão da extração seletiva de madeira no estado do Pará entre 1992 e 2018 (Figura 12).

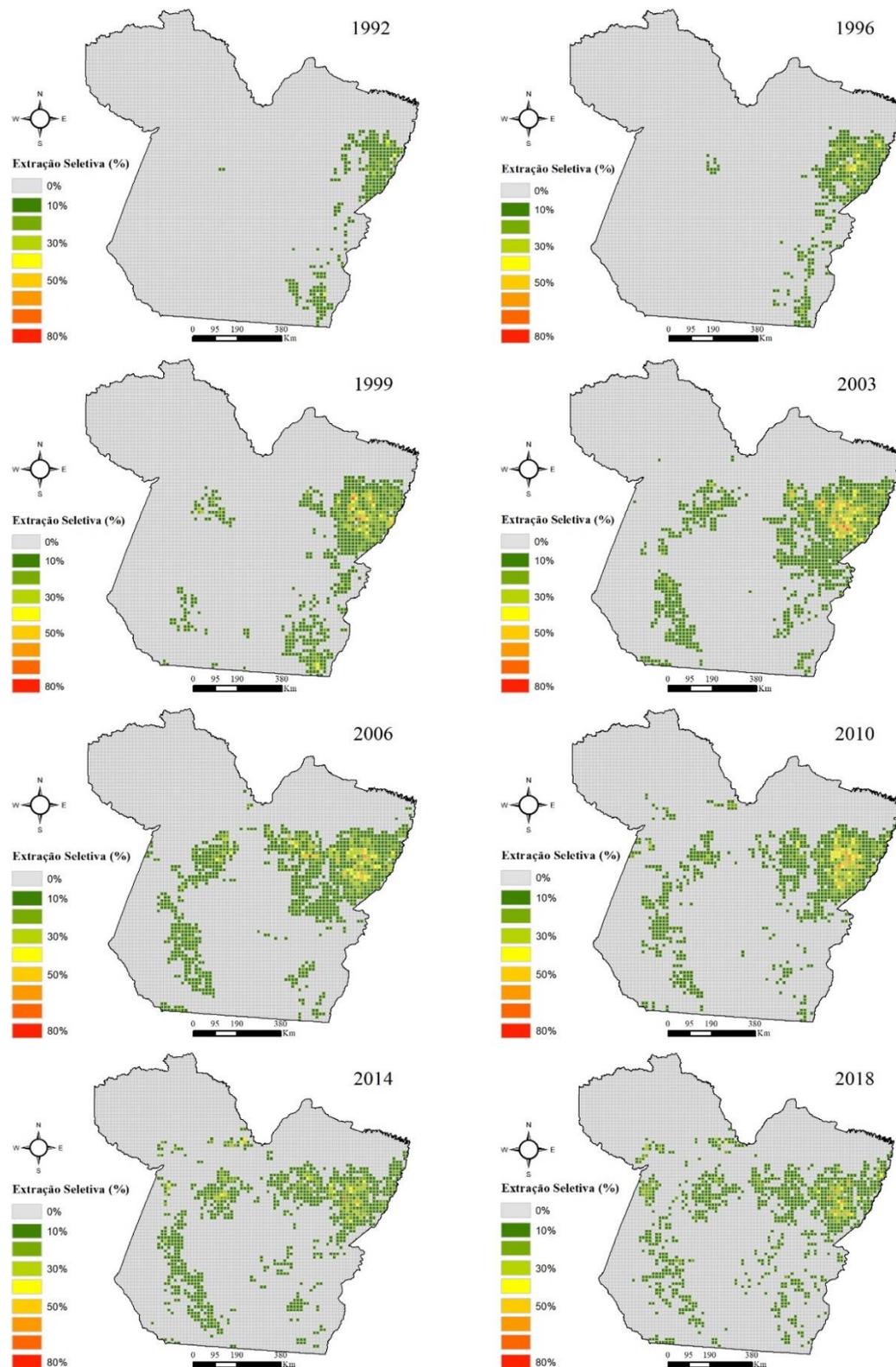


Figura 12. Distribuição espacial das florestas exploradas seletivamente no estado do Pará entre 1992 e 2018. A extração seletiva foi agregada em uma grade de polígono de 225 km² e é representada como porcentagem da extensão da extração seletiva presente em cada polígono.

5.2. Extração seletiva de madeira dentro áreas protegidas (UC's e TI)

A média de extração seletiva de madeira detectada dentro de unidades de conservação (federais, estaduais e municipais) de 1992 a 2018 foi de 345 km². Até 1999 a extração seletiva dentro de UC's somavam 57 km². No entanto, em 2003 a extração seletiva aumentou mais de 600 km². De 2014 a 2018 notou-se um aumento de 36% da degradação florestal por extração seletiva. Os anos de 2003, 2006 e 2018 foram os anos que apresentam maior área impactada por exploração de madeira. O Parque Nacional e Floresta Nacional do Jamanxim, Floresta Nacional de Altamira e Trairão apresentaram a maior área degradada por extração seletiva de madeira (Figuras 9 e 10).

A extração seletiva de madeira atingiu um total de aproximadamente 2435 km² entre 1992 e 2018. Em TI as maiores áreas exploradas somaram 466,9 km², 486,6 km² e 717,5 km², em 2006, 2014 e 2018, respectivamente. Comparando o total de áreas exploradas em Terras Indígenas, observou-se um aumento considerável entre 1992 e 2018.

A TI Alto Rio Guamá está localizada na mesorregião nordeste do estado do Pará, apresentou a maior área explorada seletivamente (35%). Em seguida aparecem a TI Kayapó com (22%), a TI Sarauá (9%), a TI Cachoeira Seca (8%), correspondendo a 74% entre 1992 e 2018 da área total de extração seletiva (Figuras 13 e 14).

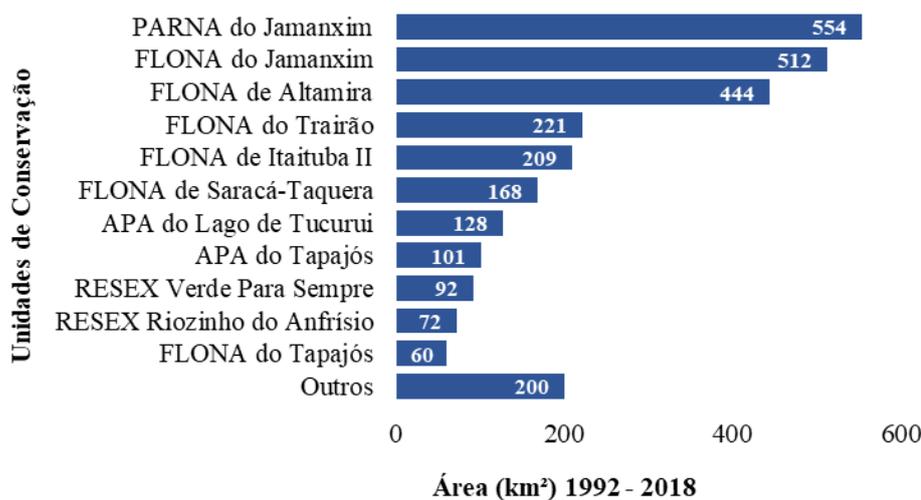


Figura 13. Área total de extração seletiva de madeira detectada dentro de Unidades de Conservação no estado do Pará entre 1992 e 2018.

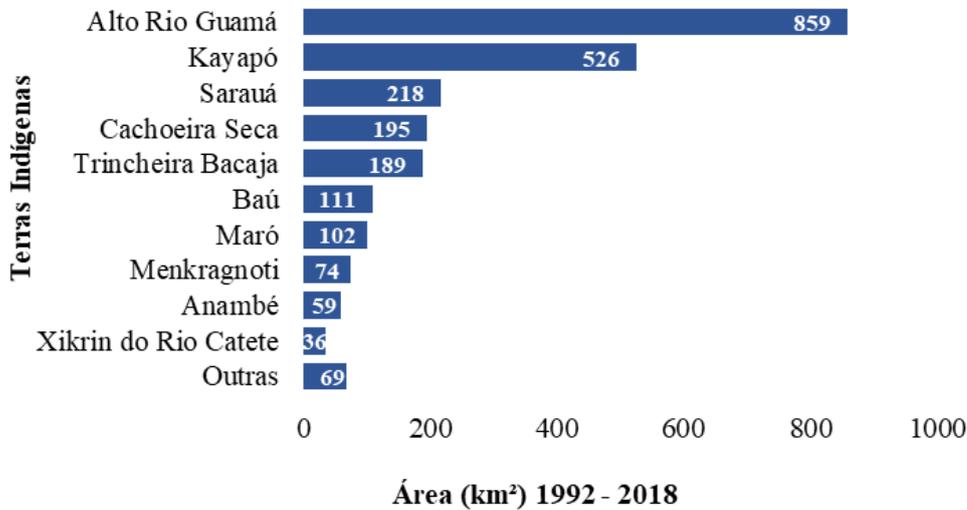


Figura 14. Área total de extração seletiva de madeira detectada dentro de Terras Indígenas no estado do Pará entre 1992 e 2018.

Estimou-se que as áreas de extração seletiva de madeira dentro de Unidades de Conservação e Terras Indígenas correspondem a 3,3% e 2,9%, respectivamente, do total de florestas exploradas no estado do Pará no período estudado. Portanto, as UC's constituíram as áreas mais impactadas, comparadas com as Terras Indígenas, por atividades de extração seletiva de madeira.

Na verificação de tendências nas séries dos dados analisados utilizando o teste de Cox-Stuart, obteve-se a estatística de $p\text{-value} = 0,625$ para UC e $p\text{-value} = 0,125$ para TI. Portanto, a hipótese nula não pode ser rejeitada e pode-se afirmar que não há tendências de aumento ou redução nas séries de dados analisadas.

5.3. Recorrência e persistência das atividades de extração seletiva de madeira

Estima-se que 51,4% do total de madeira explorada seletivamente durante o período e área de estudo foram considerados recorrentes ou persistentes, isso equivale a um total de 43.046,5 km², uma média anual de 1.655,6 km² (Tabela 6).

Em 2006 e 2010 foram estimadas as maiores áreas de extração seletiva recorrentes, envolvendo um total de florestas exploradas de 4.039,7 km² e 5.328,1 km², respectivamente. Dentre os anos analisados, o ano de 1992 sobreposto aos anos seguintes possui a menor área de florestas exploradas de forma recorrente.

Estimou-se também que as áreas mais antigas de florestas exploradas seletivamente de forma recorrente são menores enquanto as florestas exploradas mais recentemente são maiores.

Apesar de grande parte das áreas recorrentes apresentarem esse comportamento, observou-se anos em que a recorrência é maior que o ano anterior 1996 e 1999, 1999 e 2003 e 2006 e 2010 (Tabela 6).

Tabela 6. Áreas de florestas exploradas seletivamente de forma recorrente no estado do Pará em 1996, 1999, 2003, 2006, 2010, 2014 e 2018.

Áreas de recorrência de florestas exploradas seletivamente (km²)								
	1996	1999	2003	2006	2010	2014	2018	
Ano de recorrência	1992	132,91	268,54	373,58	311,87	341,42	124,35	157,42
	1996	-	1919,20	942,98	854,70	1052,86	632,02	565,59
	1999	-	-	2703,02	1746,02	2045,83	1344,18	1280,47
	2003	-	-	-	4039,68	3866,00	1792,48	1759,18
	2006	-	-	-	-	5328,06	1628,46	1639,01
	2010	-	-	-	-	-	2050,45	1815,28
	2014	-	-	-	-	-	-	2330,85
	2018	-	-	-	-	-	-	-

5.4. Incremento de florestas exploradas seletivamente

O incremento das áreas de florestas exploradas seletivamente entre 1996 e 2018 correspondeu a 52.454,5 km², uma média anual de 2.017,5 km², perfazendo 62,6% do total de florestas exploradas na área e período de análise (Tabela 7). Em 2003, observou-se o maior incremento (11.911,7 km²) nos anos analisados, seguido por 2006, com 9.859,7 km². A partir de 2006, observou-se a redução do incremento de florestas exploradas.

Tabela 7. Incremento anual da degradação de florestas exploradas seletivamente entre 1996 e 2018, sendo 1992 o primeiro ano da série analisada.

Incremento Anual (km²)	
Ano	Extração seletiva
1996	4956,52
1999	8703,85
2003	11911,66
2006	9859,67
2010	5311,09
2014	6427,04
2018	5284,68

5.5. Extração seletiva de madeira e Desmatamento

Estimou-se que um total de 16.916,4 km² de florestas exploradas seletivamente foram desmatadas entre 1992 e 2014 (Tabela 8), o que corresponde ao percentual de 20% do total de áreas exploradas. Os anos de 2006, 2010 e 2018, apresentaram as maiores áreas de florestas exploradas seletivamente que foram subsequentemente desmatadas. A maior área de extração seletiva detectada em 1992 foi desmatada sete anos após a exploração. Já em 2003, a maior área desmatada foi registrada três anos após a exploração seletiva das florestas.

Além disso, foi verificado uma redução das áreas de florestas desmatadas em 2014, quando comparadas com anos anteriores. O percentual de 31,9% de florestas exploradas seletivamente entre 1992 e 2014, foram desmatadas entre 2015 e 2018.

Tabela 8. Áreas de florestas exploradas seletivamente sobrepostas às áreas desmatadas detectadas pelos projetos do TRFIC e PRODES no estado do Pará, entre 1992 e 2018.

		Desmatamento TRFIC e PRODES (km ²)						
Anos		1996	1999	2003	2006	2010	2014	2018
Extração seletiva (km ²)	1992	320,4	564,2	300,2	223,3	126,4	41,0	44,6
	1996	-	832,8	571,9	357,9	177,8	101,6	128,2
	1999	-	-	1525,7	989,1	550,1	304,0	393,8
	2003	-	-	-	2038,3	778,9	561,6	678,7
	2006	-	-	-	-	1533,9	479,2	718,7
	2010	-	-	-	-	-	1324,4	523,5
	2014	-	-	-	-	-	-	726,4
Total Desmatado		320,4	1397,0	2397,8	3608,6	3167,1	2811,7	3213,8
Total detectado de extração seletiva		5093	10851,1	15931,3	15441,7	13139,1	10760,3	10069,32
% extração seletiva desmatada		6,3%	12,9%	15,1%	23,4%	24,1%	26,1%	31,9%
% do incremento desmatado		6,5%	16,1%	20,1%	36,6%	59,6%	43,7%	60,8%

*Desmatamento produzido pelo *Tropical Rain Forest Information Center* (TRFIC) e Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES).

A partir da construção de um gráfico de dispersão, observou-se o comportamento temporal das áreas desmatadas que ocorrem subsequentes à extração seletiva de madeira. Ao decorrer dos anos, houve um aumento nas taxas de desmatamento das florestas exploradas seletivamente, com tendência de crescimento linear (Figura 15).

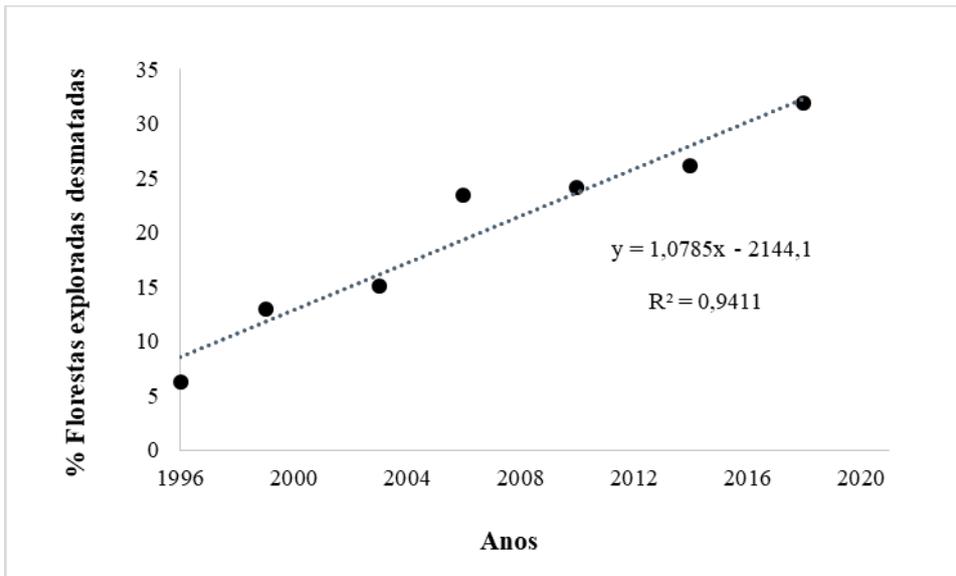


Figura 15. Variação das taxas de florestas exploradas seletivamente e desmatadas em anos subsequentes entre 1992 e 2018, no estado do Pará.

O coeficiente de determinação (R^2) explica 94% da variância das taxas de florestas exploradas seletivamente e, subsequentemente, desmatadas no período de estudo no estado do Pará. A equação de reta da linha de tendência permitiu estimar valores de y (% de extração seletiva desmatada) a partir de valores de x. A partir dessa equação é possível prever que em menos de 15 anos no futuro, metade da área explorada seletivamente será desmatada na área de estudo e nos próximos 58 anos, praticamente toda a área explorada seletivamente será desmatada em anos subsequentes.

6. DISCUSSÃO

O uso de dados e técnicas de sensoriamento remoto permitiram detectar florestas exploradas seletivamente na Amazônia (MATRICARDI et al., 2007) e, no presente estudo, foi possível mapeá-las a partir da detecção de feições das infraestruturas (pátios de estocagens e estradas de acesso) e da degradação do dossel florestal, uma vez que nessas áreas os sinais de exploração seletiva ficam mais evidentes e a resposta espectral é mais acentuada com a exposição e efeito parcial ou total do solo na floresta.

Os resultados obtidos a partir do teste de Cox-Stuart para a séries de dados analisados não apresentaram a componente tendência de crescimento. Nesse sentido, é esperado que as áreas de florestas exploradas seletivamente permaneçam nos patamares observados neste estudo nos próximos anos no estado do Pará. Os resultados deste estudo evidenciaram que houve aumento das florestas exploradas seletivamente dentro de áreas protegidas a partir de

2003, especialmente nas Unidades de Conservação. A maior parte das áreas de florestas exploradas seletivamente persistiram nas imagens durante todo o período (1992 a 2018). Entretanto, foi observado uma tendência de aumento do desmatamento das florestas exploradas seletivamente no período de estudo, que poderá se agravar nas próximas décadas. Um dos motivos é que há uma maior demanda por madeira, e de 2018 para cá foram registrados maiores taxas de desmatamento na região, resultantes do afrouxamento da fiscalização das cadeias de controle de exploração madeireira. Os resultados encontrados neste estudo apontam um aumento das áreas de extração seletiva de madeiras que foram desmatadas em anos subsequentes a extração a partir de 2006. Isto é uma grande preocupação ambiental pois boa parte das florestas exploradas seletivamente compõem planos de manejo florestal sustentado e deveriam ser mantidas para ciclos de corte futuros.

As atividades de extração seletiva de madeira no estado do Pará alteraram a dinâmica de uso e cobertura das áreas estudadas entre 1992 e 2018. Por exemplo, durante o período de estudo, um total de 83.695 km² de florestas foram impactadas por atividades de exploração seletiva de madeiras e cerca de 20% do total de áreas exploradas foram desmatadas em anos subsequentes ao da exploração florestal. Com isso, a extração seletiva de madeiras foi um fator que contribuiu para aumentar as florestas impactadas e, parcialmente, com o desmatamento no estado do Pará. A extração seletiva de madeiras vem sendo mencionada por vários autores como uma atividade que aumenta a sua vulnerabilidade à ocorrência de fogo (UHL; VIEIRA, 1989; COCHRANE; SCHULZE, 1998; STONE; LEFEBVRE, 1998; NASCIMENTO et al., 2000; SIEGERT et al., 2001; LINDENMAYER et al., 2009; MATRICARDI et al., 2010) e como um precursor do desmatamento em florestas tropicais, uma vez que esta atividade altera o ecossistema florestal e empobrece economicamente as florestas tornando-as mais vulneráveis ao fogo e a conversão para outros usos da terra mais atrativos financeiramente (ASNER et al., 2005, 2009; NEPSTAD et al., 1999).

Nepstad et al., (1999), afirmaram que a degradação por extração seletiva de madeira e o fogo constituem as principais causas do desmatamento na Amazônia. Asner et al. (2005), estimaram um aumento de 12.075 km² para 19.823 km² de florestas alteradas na Amazônia brasileira por extração seletiva de madeiras entre 1999 e 2002, 19% da área total de extração seletiva detectada foi desmatada três anos após a degradação. No presente estudo, a maior taxa (13%) de florestas alteradas que foram desmatadas foi observada em 2003, desmatadas nos 3 anos subsequentes à detecção das florestas exploradas seletivamente.

O total de degradação observado para florestas exploradas seletivamente, quando comparados com o desmatamento durante o mesmo período no Pará, revelam que em alguns anos as florestas impactadas por atividades madeireiras superou as áreas de desmatamento. Similarmente, estudos para toda a Amazônia legal indicam que entre 1992 e 2014 um total de 337.427 km² de florestas foram degradadas por fogo, fragmentação e extração seletiva enquanto o desmatamento contribuiu com a perda de 308.311 km² de florestas nativas (MATRICARDI et al., 2020). Estes autores concluíram que a extração seletiva e os incêndios florestais foram os principais fatores de degradação florestal. Portanto, os impactos causados pelas atividades de extração seletiva de madeiras é um fator significativo de mudanças da paisagem e alteração dos ecossistemas na Amazônia e, é adicional ao desmatamento (Nepstad et al., 1999; ASNER et al., 2005; MATRICARDI et al., 2020).

O desenvolvimento da Amazônia legal tem sido caracterizado pelo padrão “*boom-bust*”, ou seja, inicialmente ocorrem eventos socioeconômicos de grande intensidade envolvendo a ocupação das terras com a extração de madeira de forma predatória e intensiva provendo capital inicial para a exploração subsequente com a conversão das florestas em outros tipos de uso da terra, mais comumente a implantação de pastagens (VERÍSSIMO; PEREIRA, 2014). Após um período essa atividade de exploração de madeira entra em declínio, conseqüentemente ocorre um esgotamento dos recursos madeireiros e a ocupação da terra mais consolidada, e os ocupantes acabam migrando para novas fronteiras em busca de novas áreas florestais de menor custo financeiro (CELENTANO et al., 2012).

A extração de madeira predatória exauriu os recursos florestais em antigos polos madeireiros, como o ocorrido em Paragominas (Pará), e migrou para novas fronteiras a oeste do Pará (SCHNEIDER et al., 2000). Esta tendência foi observada espacialmente na presente pesquisa, como mostram os mapas (Apêndices C, D e E). Houve uma expansão das áreas de florestas exploradas seletivamente de polos produtores da década de 90 para outros polos mais a oeste do Estado após 2000. As florestas exploradas na década de 90, boa parte dela concentravam-se nas mesorregiões Nordeste e Sudeste Paraense, região conhecida como arco de desmatamento. A partir dos anos 2000 a degradação passa a se expandir para as mesorregiões Sudoeste e Baixo Amazonas. Cardoso; Souza (2017), avaliando a distribuição espacial da exploração madeireira não autorizada no estado do Pará entre agosto de 2015 e julho de 2016, observaram que a maior parte da exploração se concentrou nas mesorregiões Nordeste e Sudeste

Paraense (71%) e o restante no Baixo Amazonas (14%), Sudoeste Paraense (10%) e Marajó (4%).

Houve o incremento das áreas de extração seletiva de madeiras sem necessariamente ter aumentado a produção de madeiras em toras na região. Apesar dos dados de incremento apontar um aumento da degradação por extração seletiva a partir de 1999, uma série de dados do IBGE (2021), apontam uma redução no volume de madeira extraída no Pará entre 1992 e 2018. Uma possível explicação para o aumento de novas áreas exploradas sem o aumento da produção são as falhas no controle desta atividade e que as florestas exploradas podem estar sendo revisitadas em novos ciclos de corte, com menor produtividade em relação ao primeiro ciclo de corte que normalmente é bem superior aos subsequentes.

Neste sentido, avaliou-se as áreas de extração seletiva que foram recorrentes ou persistentes nas imagens. As áreas foram consideradas persistentes quando detectadas em intervalos maiores. Observamos que a maior parte das áreas impactadas por extração seletiva persistiram nas imagens de satélite durante todo o período analisado. Os primeiros anos analisados em sobreposição aos demais anos foram os que apresentaram a menor área recorrente degradada. Tal fato indica a grande abundância de matéria prima nos primeiros anos deste estudo, seguido pela escassez em anos mais recentes, que contribuiu com o aumento da recorrência da detecção de florestas previamente exploradas, num possível segundo ciclo de corte. Entre os anos 1996 e 1999, 1999 e 2003 e 2006 e 2010 observamos o aparecimento de novas áreas de florestas exploradas, é provável que essas áreas tenham sido revisitadas entre os intervalos de análises, no entanto, só foram detectadas no ano de análise.

Dependendo da intensidade da exploração o impacto da atividade permanece visível por cerca de 3 a 4 anos, e em casos de impactos severos da atividade de extração de madeira a exposição do solo pode ser observada mesmo após 5 anos de exploração (MATRICARDI et al., 2005). Assim, apesar da floresta ter capacidade de se recuperar após esse intervalo de tempo, uma das razões para que a degradação por extração seletiva tenha permanecido visível durante todo o período estudado, é que os madeireiros podem visitar as áreas exploradas em um curto intervalo de tempo para remover as espécies de menor valor comercial (UHL et al., 1997). Pois ao contrário do desmatamento, a degradação pode ocorrer novamente com frequência variada na mesma área, por vezes vários anos depois, e diferentes tipos podem se sobrepor espacialmente (MATRICARDI et al., 2020). Com o tempo, à medida que a exploração florestal continua na mesma área, a extensão da degradação florestal aumenta, e esse padrão de

exploração recorrente em anos consecutivos pode resultar na fragmentação florestal (BROADBENT et al., 2008).

A fragmentação da floresta pode resultar em perda de habitat, redução da biodiversidade, formação de bordas, além disso, também é responsável pelo aumento das emissões de carbono (HANSEN et al., 2020). A criação de novas bordas de floresta aumenta a mortalidade de árvores e a frequência de incêndios (BROADBENT et al., 2008). Nesse contexto a fragmentação florestal também oferece risco a áreas protegidas, pois, à medida que essas áreas são exploradas elas acabam sendo reduzidas a fragmentos menores, e tornam-se mais vulneráveis a pressões antrópicas (HANSEN et al., 2020). Sendo assim, destaca-se a importância de entender o avanço da atividade de extração seletiva de madeira no interior dessas áreas.

Outro fator relevante, que não foi analisado no presente estudo, é a ilegalidade das áreas exploradas. O estado do Pará é o maior produtor de madeira na Amazônia, no entanto, entre (2015 e 2016) 44% de toda a madeira colhida era ilegal (CARDOSO; SOUZA, 2017). Avaliando as evidências e fraude na indústria madeireira no Pará, pesquisadores indicam que o modelo de monitoramento adotado no estado apresenta lacunas, que vão de fraudes durante o licenciamento de extração de madeira, aprovação de atividades de madeireiras em áreas que já foram exploradas ou desmatadas, registros de inventários falsos, superestimação do volume ou densidade de espécies valiosa, essas irregularidades acabam sendo usadas para extrair madeiras ilegalmente, transportar e vender madeira em áreas não autorizadas ou proibidas (BRANCALION et al., 2018).

Os resultados deste estudo indicaram que houve um aumento das áreas de florestas exploradas seletivamente dentro de áreas protegidas. Esse aumento na área florestal explorada, embora não tenha sido estatisticamente significativo, revela que as áreas protegidas estão cada vez mais expostas a extração ilegal de madeira, pois estas atividades são consideradas em sua maioria ilegais, especialmente dentro de Terras Indígenas. Estudos realizados na Amazônia apontam esse comportamento de aumento da degradação em áreas protegidas, que parecem estar relacionadas com sua proximidade a áreas desmatadas, estradas e vias de acesso ilegais (PEDLOWSKI et al., 2005; MATRICARDI et al., 2007; COSTA, 2017; MORETTI et al., 2020).

As áreas protegidas são uma importante estratégia de controle já que estabelece limites e dinâmica de uso e ocupação (MEDEIROS, 2006). Inicialmente, apenas as UC's eram consideradas áreas protegidas de acordo com lei nº 9.985 que instituiu o Sistema Nacional de

Unidades de Conservação em 2000 (BRASIL, 2000). No entanto, a partir do Plano Nacional de Áreas Protegidas esse conceito é incluído a TI e Territórios Quilombolas (PNAP, 2006).

Unidades de Conservação e Terras Indígenas são áreas passíveis de proteção que tem como objetivo a conservação da diversidade biológica, regulação climática, conservação do solo por meio da preservação da vegetação nativa (YOUNG; MEDEIROS, 2018). Embora as áreas protegidas sejam uma importante ferramenta para a conservação dos recursos naturais, a sua integridade é frequentemente ameaçada por madeireiros ilegais que recorrem a Unidades de Conservação e Terras Indígenas em busca de novas áreas para extração seletiva de madeira (PEDLOWSKI et al., 2005).

O Sistema Nacional de Unidades de Conservação define que dentro das unidade de proteção integral são admitidos apenas o uso indireto dos recursos naturais, com exceção dos casos previstos em lei (BRASIL, 2000). Porém, pode-se observar que seis UC's de Proteção Integral (Parque Nacional do Jamanxim, Parque Nacional do Rio Novo, Reserva Biológica Nascente da Serra do Cachimbo, Estação Ecológica Estadual da Terra do Meio, Reserva Biológica do Gurupi e Parque Estadual da Serra dos Martírios/ Andorinhas) foram exploradas seletivamente durante o período de análise, justamente às áreas mais protegidas por lei. Ainda que essas áreas apresentem maior restrição, acabam sendo mais afetadas, pois estão em locais sob maior pressão antrópica na Amazônia (NOLTES et al., 2013). Em áreas de UC's a degradação parece estar relacionada não apenas com à extração ilegal de madeira, como também a problemas de ocupação ilegal e deficiência nas ações de fiscalização e na aplicação da legislação ambiental.

Os resultados deste estudo evidenciaram exploração florestal dentro de unidades de conservação de uso sustentável, que são áreas que permitem a extração sustentável de madeira, sendo que a maior proporção de degradação foi detectada nas áreas de Proteção Ambiental (APA). Analisando a degradação florestal por extração seletiva de madeira no interior de áreas protegidas da Amazônia, estudos apontam que a maior parte das áreas degradadas ocorreram dentro de Terras Indígenas (MATRICARDI et al., 2007; CARDOSO; SOUZA JR, 2018; MORETTI et al., 2020).

As UC's foram as áreas mais impactadas por exploração seletiva de madeira no estado do Pará entre 1992 e 2018. Este fato pode estar relacionado às características do estado do Pará, que possui extensas áreas designadas para comporem territórios de Unidades de Conservação (DRUMMOND; FRANCO; OLIVEIRA, 2010), além de ter o maior número de áreas

protegidas no ranking de ameaça e pressão antrópica (IMAZON, 2021). Moretti et al., (2020), sugerem que o motivo da maior parte da extração seletiva ocorrer dentro de UC's possa estar relacionado a proximidade das áreas exploradas com áreas desmatadas, e que essa proximidade facilita a entrada de agentes da extração ilegal de madeira que formalizam contratos verbais com posseiros para explorar os recursos madeireiros.

Vale destacar que algumas áreas no estado do Pará tem autorização do Governo para realizar o manejo florestal sustentável a partir da implementação da política de concessões florestais que permite a extração de produtos e exploração de serviços (MAPA, 2021). Das unidades de concessão quatro estão na Floresta Nacional de Sacará-Taquera (PA), duas na Floresta Nacional de Crepori (PA), quatro na Floresta Nacional de Altamira (PA) e três na Floresta Nacional de Caixuanã (PA)(BRASIL, 2021). O Serviço Florestal Brasileiro é órgão responsável pelo monitoramento e gestão dos contratos de concessão florestal das Unidades de Manejo Florestal. Portanto, a exploração madeireira dentro dessas áreas seguem os princípios de sustentabilidade e conservação dos recursos (CARDOSO; SOUZA JR, 2018).

A partir da equação do gráfico de dispersão, foi possível simular o tempo provável em que as áreas exploradas seletivamente serão desmatadas no futuro. Para o cenário avaliado é esperado que até 2034 metade das áreas exploradas no estado do Pará sejam desmatadas, e que praticamente toda a área explorada seletivamente, detectada neste estudo estará desmatada até 2080. No entanto, é importante ressaltar que a projeção levou em consideração apenas as áreas que foram exploradas seletivamente, e que outros fatores como fragmentação e incêndios florestais também contribuem com esse processo de degradação e desmatamento no estado do Pará. Com base em mapeamento das mudanças de cobertura da terra da última década Brochado (2017), considerou três cenários para elaborar prognóstico de desmatamento no Pará até 2030. Os resultados encontrados mostram que a área desmatada para o ano de 2030 foi de 689.160,37 km² para o cenário 1, 754.960,88 km² para o cenário 2 e 741.947,62 para o cenário 3. Os resultados também mostraram que as UC's e TI por si só não terão capacidade de conter o avanço do desmatamento, sendo necessário políticas mais restritivas ao uso.

7. CONCLUSÃO

Embora não tenha sido detectada tendências de crescimento significativas na série de dados analisados, os resultados deste estudo apontam um aumento nas áreas de florestas exploradas seletivamente, especialmente nas duas últimas décadas de estudo. Também observamos mudança na dinâmica espacial da exploração florestal seletiva, que se

concentraram na região conhecida como arco do desmatamento da Amazônia dentro do estado do Pará. Apesar disso, em anos mais recentes, observou-se que as florestas impactadas por atividades madeireiras foram mais frequentemente detectadas em região de fronteira do desmatamento no estado do Pará. Esta migração está associada a maior disponibilidade de matéria prima e a expansão da fronteira agrícola, associado a existência de novas áreas ainda não exploradas. A partir da sobreposição das áreas de florestas exploradas, os resultados permitem concluir que houve aumento na recorrência da exploração seletiva de madeiras.

Foi possível determinar que aproximadamente 20% do total de florestas exploradas seletivamente durante o período de 26 anos foram desmatadas. A extração seletiva de madeira, portanto, não foi o principal precursor do desmatamento no estado do Pará e, em sua maior parte, apresentou uma distribuição espacial distinta e independente do desmatamento.

O presente estudo evidenciou que ocorreram impactos nas florestas causados por atividades de extração seletiva de madeiras dentro de áreas protegidas, no entanto, não foram expressivos do ponto de vista espacial, ou seja, quando comparado a todo o território do estado do Pará, porém detectamos incremento constante ao longo do período estudado. Por isso, a extração seletiva dentro de áreas protegidas deve ser devidamente considerada e monitorada, pois se trata de atividades ilegais, exceto em algumas Florestas Nacionais onde o manejo florestal é devidamente autorizado pelo poder público federal.

O mapeamento de toda a extensão da extração seletiva de madeira no estado do Pará permitiu avaliar a dinâmica espacial e temporal das florestas exploradas e a sua relação com as mudanças na cobertura da terra. Os resultados deste estudo contribuem para que os tomadores de decisão possam reforçar ações de conservação/preservação das florestas, principalmente porque, a floresta Amazônica desempenha um papel crucial na conservação da biodiversidade e mudanças climáticas globais.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1. Revisita das questões de pesquisa

1. Qual a área de florestas nativas impactadas pelas atividades de extração seletiva de madeira no estado do Pará entre 1992 e 2018? Estas áreas superaram as áreas desmatadas naquele Estado?

A partir da combinação de técnicas de interpretação visual e classificação semiautomática, foi detectado 83.694,8 km² de florestas exploradas seletivamente no estado do Pará entre 1992 e 2018. As áreas de florestas exploradas seletivamente dentro de UC's foram superiores ao encontrado dentro de TI entre 1992 e 2018. Estimou-se que 2.761,9 km² e 2.435,0 km² de florestas foram exploradas dentro de Unidades de Conservação e Terras Indígenas. O total de área impactada por extração seletiva de madeira foi superior ao total de área desmatada até o ano de 2018.

2. Onde estão localizadas as florestas exploradas seletivamente? Por que ocorreram em determinados locais e não em outros?

As atividades de extração seletiva de madeiras no estado do Pará se concentraram nas mesorregiões Nordeste e Sudeste Paraense. No decorrer dos anos estudados, as florestas impactadas por atividades madeireiras se expandiram para novas regiões próximas as fronteiras do desmatamento, onde existe maior abundância de matéria prima de madeiras de florestas nativas. No entanto, mesmo com a migração da exploração seletiva para novas fronteiras, grande parte das florestas exploradas permaneceram na região conhecida como arco do desmatamento. Os resultados também mostraram a ocorrência e o aumento das atividades de extração seletiva dentro de áreas protegidas no período de estudo. As principais razões da dinâmica espacial das atividades madeireiras devem estar relacionadas a escassez de matéria prima (madeira) de florestas nativas em velhas fronteiras, a distância de estradas escoadoras da produção florestal e dos polos madeireiros, que facilitam o acesso e a comercialização dos recursos florestais.

3. Qual o destino das florestas exploradas seletivamente no estado do Pará?

A maior parte (80%) das florestas exploradas seletivamente entre 1992 e 2018 permaneceram na área de estudo. A extração seletiva de madeiras não foi, portanto, precursora do desmatamento no estado do Pará no período estudado. As áreas exploradas passaram por alterações no dossel florestal ao longo do período estudado, que possibilitaram

a detecção e mapeamento destas áreas usando imagens *Landsat*, sendo que foram detectados 2.409 km² de florestas impactadas por extração seletiva em 1992 e 10.070 km² em 2018. O maior aumento foi observado no período de 1996 a 1999. Porém, em 2003 foi o ano com maior área de florestas impactadas por atividades de extração seletiva de madeira.

9. REFERÊNCIAS

AMARAL, P. et al. **Floresta para Sempre: um Manual para Produção de Madeira na Amazônia**. IMAZON ed. Belém: [s.n.].

ANWAR, S.; STEIN, A. Detection and spatial analysis of selective logging with geometrically corrected Landsat images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 24, p. 7820–7843, 2012.

ARAGÃO, L. E. O. C. et al. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1498, p. 1779–1785, 2008.

ASNER, G. P. et al. Remote sensing of selective logging in Amazonia: Assessing limitations based on detailed field observations, Landsat ETM+, and textural analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 3, p. 483–496, 2002.

ASNER, G. P. et al. Selective Logging in the Brazilian Amazon. **Science**, v. 310, n. 5747, p. 480–482, 21 out. 2005.

ASNER, G. P. et al. Selective logging and its relation to deforestation. In: [s.l: s.n.]. p. 25–42.

BACCINI, A. et al. Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss. **Science**, v. 358, n. 6360, p. 230–234, 2017.

BRAGA, P. I. S. Subdivisão fitogeográfica, tipos de vegetação, conservação e inventário florístico da floresta amazônica. **Acta Amazonica**, v. 9, n. 4 suppl 1, p. 53–80, 1979.

BRANCALION, P. H. S. et al. Fake legal logging in the brazilian amazon. **Science Advances**, v. 4, n. 8, p. 1–8, 2018.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de Julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. . 2000.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de Maio de 2012. Código Florestal Brasileiro. . 2012.

BRASIL. **Concessões Florestais em Andamento**. Disponível em: <<https://www.florestal.gov.br/florestas-sob-concessao>>. Acesso em: 19 jan. 2022.

BROADBENT, E. N. et al. Forest fragmentation and edge effects from deforestation and selective logging in the Brazilian Amazon. **Biological Conservation**, v. 141, n. 7, p. 1745–1757, jul. 2008.

BROCHADO, M. L. C. **Avaliação de cenários de desmatamento para o estado do Pará**. Brasília: Universidade de Brasília, 2017.

BRYAN, J. et al. Impact of logging on aboveground biomass stocks in lowland rain forest, Papua New Guinea. **Ecological Applications**, v. 20, n. 8, p. 2096–2103, 2010.

CARDOSO, D. R. R. S. et al. Análise Da Conversão De Áreas Degradadas Em

Desmatamentos , Nos Estados Do Pará E Mato Grosso , Entre 2007 E 2017. **Anais do XIX Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 1895–1898, 2019.

CARDOSO, D.; SOUZA, C. **Sistema de Monitoramento da Exploração Madeireira (Simex): Estado do Pará 2015-2016**. Belém, PA: IMAZON, 2017.

CARDOSO, D.; SOUZA JR, C. **Degradação Florestal em Áreas Protegidas**. Belém/ Pará: IMAZON, 2018.

CELENTANO, D. et al. Welfare outcomes and the advance of the deforestation frontier in the brazilian Amazon. **World Development**, v. 40, n. 4, p. 850–864, 2012.

COCHRANE, M. A. Linear mixture model classification of burned forests in the Eastern Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 17, p. 3433–3440, 28 nov. 1998.

COCHRANE, M. A.; BARBER, C. P. Climate change, human land use and future fires in the Amazon. **Global Change Biology**, v. 15, n. 3, p. 601–612, 2009.

COCHRANE, M. A.; SCHULZE, M. D. Forest Fires in the Brazilian Amazon. **Conservation Biology**, v. 12, n. 5, p. 948–950, out. 1998.

COSTA, O. B. DA. **Degradação Florestal por extração seletiva e fogo na Amazônia Legal**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2017.

COSTA, O. B. DA et al. Selective logging detection in the Brazilian Amazon. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 2, 2019.

COX, A. D. R.; STUART, A. Biometrika Trust Some Quick Sign Tests for Trend in Location and Dispersion. **Biometrika**, v. 42, n. 1, p. 80–95, 1955.

DAVIDSON, E. A. et al. The Amazon basin in transition. **Nature**, v. 481, n. 7381, p. 321–328, 2012.

DRUMMOND, J. A.; FRANCO, J. L. A.; OLIVEIRA, D. Uma análise sobre a história e a situação das unidades de conservação no Brasil. In: **Conservação da Biodiversidade Legislação e Políticas Públicas**. Brasília: Câmara dos Deputados, 2010. p. 341–386.

DYKSTRA, D. P. **2. Reduced impact logging: concepts and issues**. [s.l: s.n.].

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/solos/sibcs/solos-do-brasil>>. Acesso em: 26 out. 2019.

FAO. Assessing forest degradation: Towards the development of globally applicable guidelines. **Forest Resources Assessment**, p. 99, 2011.

FAO. **Global Forest Resources Assessment 2015 How are the world's forest changing?** Second edi ed. Rome: [s.n.].

FEARNSIDE, P. Deforestation of the Brazilian Amazon. In: **Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science**. Oxford University Press: 2017, 2017.

FEARNSIDE, P. M.; NOGUEIRA, E. M.; YANAI, A. M. Maintaining carbon stocks in extractive reserves in Brazilian Amazonia. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 48, p. 446–476, 2018.

FILGUEIRAS, G. C. et al. Desenvolvimento local sustentável através da produção concentrada de madeira em tora no Estado do Pará. **Agroecossistema**, v. 9, p. 102–129, 2017.

GATTI, C. R. et al. The impact of selective logging and clearcutting on forest structure, tree diversity and above-ground biomass of African tropical forests. **Ecological Research**, v. 30, n. 1, p. 119–132, 2015.

GHAZOUL, J. et al. Conceptualizing Forest Degradation. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 30, n. 10, p. 622–632, 2015.

GOODMAN, R. C. et al. Carbon emissions and potential emissions reductions from low-intensity selective logging in southwestern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 439, n. February, p. 18–27, 2019.

GOOGLE EARTH ENGINE - GEE. **No Title**. Disponível em: <<https://earthengine.google.com/faq/>>. Acesso em: 27 out. 2019.

GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18–27, dez. 2017.

GOVERNO DO PARÁ. **O Pará**. Disponível em: <<https://www.pa.gov.br/>>.

GREENPEACE. Face a Face com a Destruição: Relatório Greenpeace sobre as companhias multinacionais madeireiras na Amazônia Brasileira. p. 21, 1999.

HANSEN, M. C. et al. High-Resolution Global Maps of. **Science Magazine**, v. 342, p. 850–854, 2013.

HANSEN, M. C. et al. The fate of tropical forest fragments. **Science Advances**, v. 6, n. 11, p. 1–10, 2020.

HARALICK, R. M.; DINSTEIN, I.; SHANMUGAM, K. Textural Features for Image Classification. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. SMC-3, n. 6, p. 610–621, 1973.

HETHCOAT, M. G. et al. A machine learning approach to map tropical selective logging. **Remote Sensing of Environment**, v. 221, p. 569–582, 1 fev. 2019.

HOUGHTON, R. A. et al. Carbon emissions from land use and land-cover change. **Biogeosciences**, v. 9, n. 12, p. 5125–5142, 2012.

IBGE. **Conheça cidades e estados do Brasil**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/panorama>>. Acesso em: 25 out. 2019.

IBGE. **Amazônia Legal**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao/15819-amazonia-legal.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 25 out. 2021.

IBGE. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/292>>. Acesso em: 26 ago. 2021.

IMAZON. **Pará é o estado que tem mais áreas protegidas que sofrem pressão e ameaça de desmatamento na Amazônia**. Pará: [s.n.]. Disponível em: <<https://imazon.org.br/imprensa/para-estado-com-mais-areas-protetidas-que-sofrem-pressao-e-ameaca-de-desmatamento-na-amazonia/>>. Acesso em: 28 set. 2021.

INMET. **Normas Climatológicas do Brasil**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/normais>>. Acesso em: 28 jul. 2021.

INPE. **Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite**. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>>. Acesso em: 26 out. 2021a.

INPE. **Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite**. Disponível em: <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/rates>. Acesso em: 1 set. 2021b.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **INPE consolida 7.536 km² de desmatamento na Amazônia em 2018**. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/OBT/noticias/inpe-consolida-7-536-km2-de-desmatamento-na-amazonia-em-2018>>. Acesso em: 22 out. 2019.

ITTO. ITTO guidelines for the restoration , management and rehabilitation of degraded and secondary ITTO guidelines for the restoration , management and rehabilitation of. **Organization**, n. 13, p. 84, 2002.

JANECZEK, D. J. **Detection and measurement of amazon tropical forest logging using remote sensing data**. [s.l.] Michigan Sate University, 1999.

KE, Y. et al. Characteristics of Landsat 8 OLI-derived NDVI by comparison with multiple satellite sensors and in-situ observations. **Remote Sensing of Environment**, v. 164, p. 298–313, 2015.

KELSEY, K. C.; NEFF, J. C. Estimates of aboveground biomass from texture analysis of landsat imagery. **Remote Sensing**, v. 6, n. 7, p. 6407–6422, 2014.

KOLTUNOV, A. et al. Selective logging changes forest phenology in the Brazilian Amazon: Evidence from MODIS image time series analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 11, p. 2431–2440, 2009.

LAURANCE, W. F. et al. The Future of the Brazilian Amazon. **Science**, v. 291, n. 5503, p. 438–439, 2001.

LENTINI, M.; VERÍSSIMO, A.; PEREIRA, D. A Expansão Madeireira na Amazônia. **O**

Estado da Amazonia, n. Tabela 1, p. 4, 2005.

LONGO, M. et al. Impacts of Degradation on Water, Energy, and Carbon Cycling of the Amazon Tropical Forests. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 125, n. 8, p. 1–27, 2020.

LOUREIRO, R. S. D. E. et al. Estudo dos eventos extremos de precipitação ocorridos em 2009 no estado do Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. Li, p. 83–94, 2014.

LUND, H. G. A “forest” by any other name... **Environmental Science and Policy**, v. 2, n. 2, p. 125–133, 1999.

MAPA. **Plano Anual de Outorga Florestal - PAOF 2022**. Brasília/DF: [s.n.].

MARENGO, J. A. et al. Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, n. December, p. 1–21, 2018.

MARETTO, R. V. et al. Spatio-Temporal Deep Learning Approach to Map Deforestation in Amazon Rainforest. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 18, n. 5, p. 771–775, 2021.

MARGULIS, S. **Causas do Desmatamento da Amazônia Brasileira**. 1º edição ed. [s.l.: s.n.]. v. 1

MARTIN, P. A. et al. Impacts of tropical selective logging on carbon storage and tree species richness: A meta-analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 356, p. 224–233, 2015.

MATRICARDI, E. A. T. **Multi-temporal assessment of selective logging using remotely sensed data in the Brazilian Amazon**. [s.l.] Michigan State University, 2003.

MATRICARDI, E. A. T. et al. Monitoring selective logging in tropical evergreen forests using landsat: Multitemporal regional analyses in Mato Grosso, Brazil. **Earth Interactions**, v. 9, p. 24, 2005.

MATRICARDI, E. A. T. et al. Multi-temporal assessment of selective logging in the Brazilian Amazon using Landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 1, p. 63–82, 2007.

MATRICARDI, E. A. T. et al. Assessment of tropical forest degradation by selective logging and fire using Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 5, p. 1117–1129, maio 2010.

MATRICARDI, E. A. T. et al. Assessment of forest disturbances by selective logging and forest fires in the Brazilian Amazon using Landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 4, p. 1057–1086, 2013.

MATRICARDI, E. A. T. et al. Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon. **Science**, v. 369, n. 6509, p. 1378–1382, 2020.

- MEDEIROS, R. Evolução das tipologias e categorias de áreas protegidas no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. IX, n. 1, p. 42–64, 2006.
- MENESES, P. R. et al. **Introdução Ao Processamento De Imagens De Sensoriamento Remoto**. Brasília: UNB, 2012.
- MILLER, S. D. et al. Reduced impact logging minimally alters tropical rainforest carbon and energy exchange. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 108, n. 48, p. 19431–19435, 2011.
- MORAES, B. C. DE et al. Variação espacial e temporal da precipitação no Estado do Pará. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 207–214, 2005.
- MORETTI, M. S. et al. Dinâmica espaço-temporal da extração seletiva de madeiras no estado de Mato Grosso entre 1992 e 2016. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 3, p. 796–808, 2020.
- MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de séries temporais**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2006.
- NEPSTAD, D. et al. and Soy Supply Chains. **Science**, v. 344, n. 6188, p. 1118–1123, 2014.
- NEPSTAD, D. C. et al. Large-scale impoverishment of amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v. 398, n. 6727, p. 505–508, 1999.
- NUMATA, I. et al. Fire and edge effects in a fragmented tropical forest landscape in the southwestern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 401, p. 135–146, 2017.
- PANTOJA, N. V. **Técnicas de processamento de imagens digitais para detecção de feições associadas ao corte selectivo de madeira na Amazônia**. [s.l.] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2010.
- PATEL, N. N. et al. Multitemporal settlement and population mapping from landsat using google earth engine. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 35, p. 199–208, 2015.
- PEDLOWSKI, M. A. et al. Conservation units: A new deforestation frontier in the Amazonian state of Rondônia, Brazil. **Environmental Conservation**, v. 32, n. 2, p. 149–155, 2005.
- PEREIRA, R. et al. Forest canopy damage and recovery in reduced-impact and conventional selective logging in eastern Para , Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 168, p. 77–89, 2002.
- PINARD, M. et al. Creating Timber Harvest Guidelines for a Reduced-Impact Logging Project in Malaysia. **Journal of Forestry**, n. October, 1995.
- PINHEIRO, T. F. et al. Forest degradation associated with logging frontier expansion in the Amazon: The BR-163 region in southwestern Pará, Brazil. **Earth Interactions**, v. 20, n. 17, 2016.

PNAP. **Plano Estratégico Nacional de Áreas Protegidas, estabelecido pelo Decreto nº 5.758, de 13 de abril de 2006.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente - MMA, 2006.

PUTZ, F. E. et al. Tropical forest management and conservation of biodiversity: An overview. **Conservation Biology**, v. 15, n. 1, p. 7–20, 2001.

PUTZ, F. E. et al. Reduced-impact logging: Challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 7, p. 1427–1433, set. 2008.

RIVERO, S. et al. Pecuária e desmatamento: Uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. **Nova Economia**, v. 19, n. 1, p. 41–66, 2009.

ROY, D. P. et al. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. **Remote Sensing of Environment**, v. 145, p. 154–172, abr. 2014.

SANTOS, J. R. DOS et al. Dados multitemporais TM/Landsat aplicados ao estudo da dinâmica de exploração madeireira na Amazônia. **X Sbsr**, p. 1751–1755, 2001.

SCHNEIDER, R. R. et al. **Sustainable Amazon: limitations and opportunities for rural development.** Brasília: World Bank and Imazon, 2000.

SEMAS. **I RELATÓRIO BIENAL DE ATIVIDADES SEMAS : 2019 - 2020.** Belém, PA: [s.n.].

SILVA, E. J. V. DA. **Dinâmica de florestas manejadas e sob exploração convencional na Amazônia Oriental.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2004.

SOUZA, C.; BARRETO, P. An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forests in the Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 1, p. 173–179, 25 jan. 2000.

STONE, T. A.; LEFEBVRE, P. Using multi-temporal satellite data to evaluate selective logging in Para, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 13, p. 2517–2526, 25 jan. 1998.

TEIXEIRA-GANDRA, C. F. A. et al. Modelagem estocástica : previsão das temperaturas para a localidade de Pelotas / RS / Brasil Stochastic modeling : temperature forecast for the city of Pelotas / RS / Brazil Introdução. p. 18–28, 2014.

THALÊS, M.; POCCARD-CHAPUIS, R.; RUIVO, M. DE L. Cartography of the pioneer fronts and contribution to the analysis of deforestation in Pará. **Mercator - Revista de Geografia da UFC**, v. 20, n. e20018, p. 1–15, 2021.

TRITSCH, I. et al. Multiple Patterns of Forest Disturbance and Logging Shape Forest Landscapes in Paragominas, Brazil. **Forests**, v. 7, n. 12, p. 315, 13 dez. 2016.

UHL, C. et al. Natural resource management in the Brazilian amazon: An integrated research approach. **BioScience**, v. 47, n. 3, p. 160–168, 1997.

UHL, C.; VIEIRA, I. C. G. Ecological Impacts of Selective Logging in the Brazilian

Amazon : A Case Study from the Paragominas Region of the State of Para Published by : The Association for Tropical Biology and Conservation Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/2388700> Ecologica. **Biotropica**, v. 21, n. 2, p. 98–106, 1989.

UMUNAY, P. M. et al. Selective logging emissions and potential emission reductions from reduced-impact logging in the Congo Basin. **Forest Ecology and Management**, v. 437, n. November 2018, p. 360–371, 2019.

USGS. Landsat Missions: Imaging the Earth Since 1972. **Landsat Missions Timeline**, v. 2020, n. November, p. 2013–2016, 2018.

VENTURIERI, A.; NASCIMENTO JR, J. DE D. B.; OLIVEIRA JR, M. C. M. **Quantificação e qualificação da cobertura e uso da terra nos municípios do estado do Pará**. Belém/ Pará: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/amazonia-oriental/publicacoes>>.

VERÍSSIMO, A. et al. Logging impacts and prospects for sustainable forest management in an old Amazonian frontier: The case of Paragominas. **Forest Ecology and Management**, v. 55, n. 1–4, p. 169–199, dez. 1992.

VERÍSSIMO, A. et al. Extraction of a high-value natural resource in Amazonia: the case of mahogany. **Forest Ecology and Management**, v. 72, n. 1, p. 39–60, 1995.

VERÍSSIMO, A.; PEREIRA, D. Produção na Amazônia Florestal: características, desafios e oportunidades. **Parceria Estratégica**, v. 19, n. 38, p. 13–44, 2014.

WATRIN, O. S.; ROCHA, A. M. A. Levantamento da Vegetação Natural e do Uso da Terra no Município de Paragominas (PA) utilizando imagens TM/ Landsat. **EMBRAPA**, p. 42, 1992.

YOUNG, C. E. F.; MEDEIROS, R. **Quanto vale o verde: a importância econômica das Unidades de Conservação brasileiras**. Rio de Janeiro: Conservação Internacional, 2018.

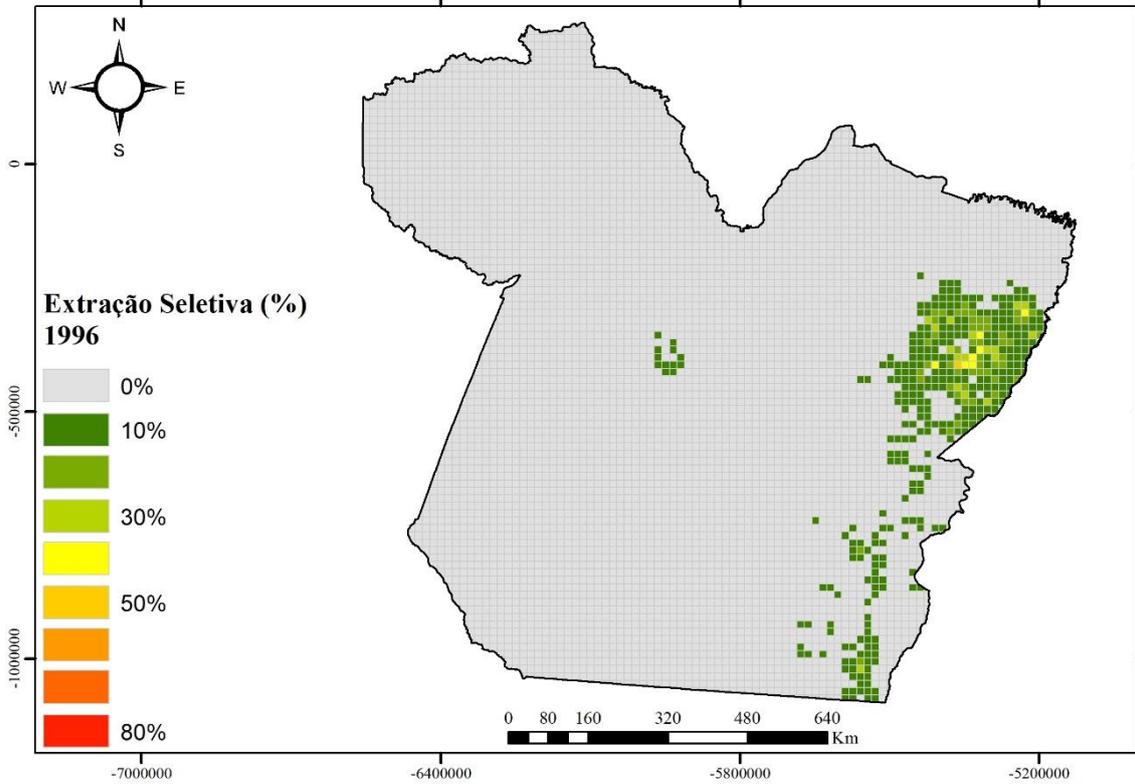
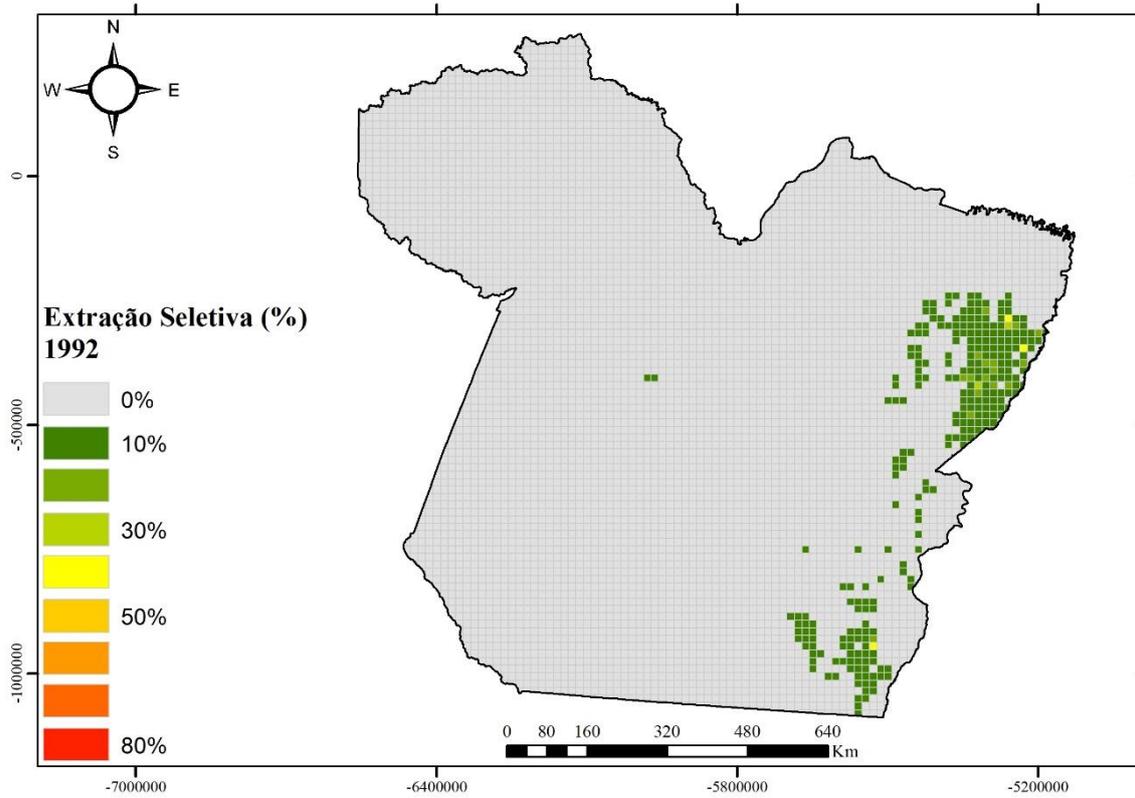
YUAN, W. et al. Early Prediction of Soybean Traits through Color and Texture Features of Canopy RGB Imagery. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–17, 2019.

APÊNDICES

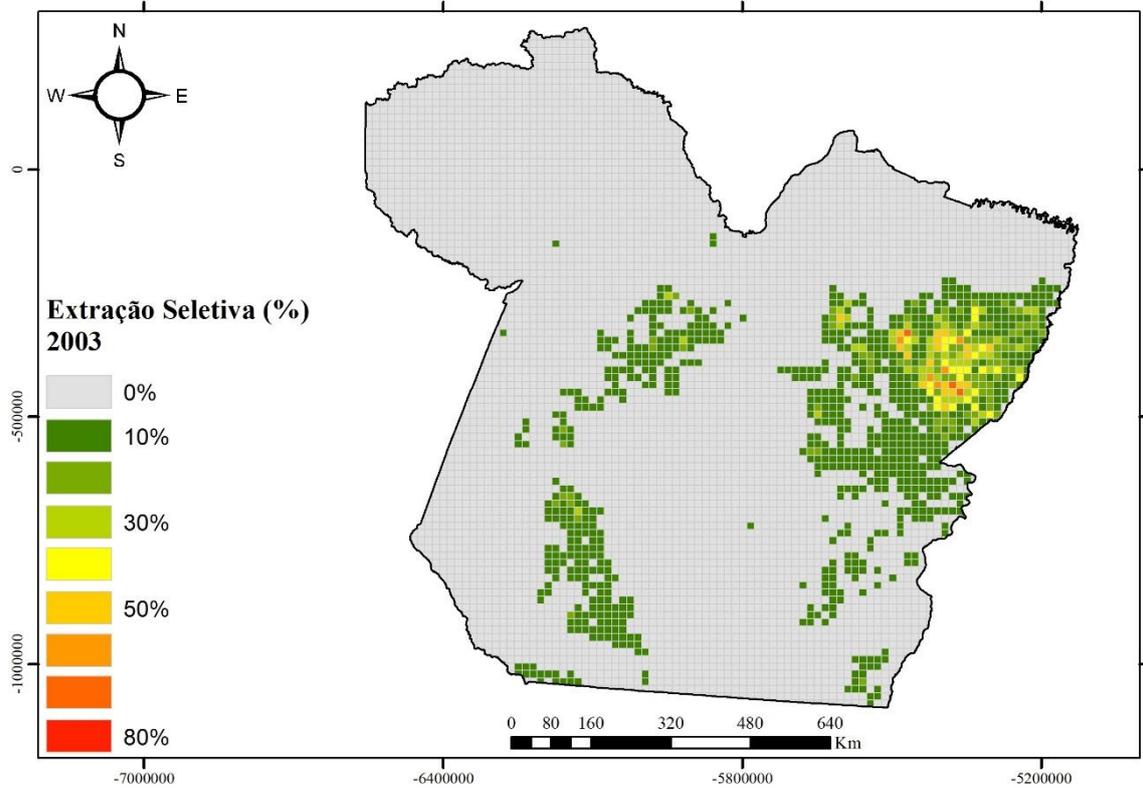
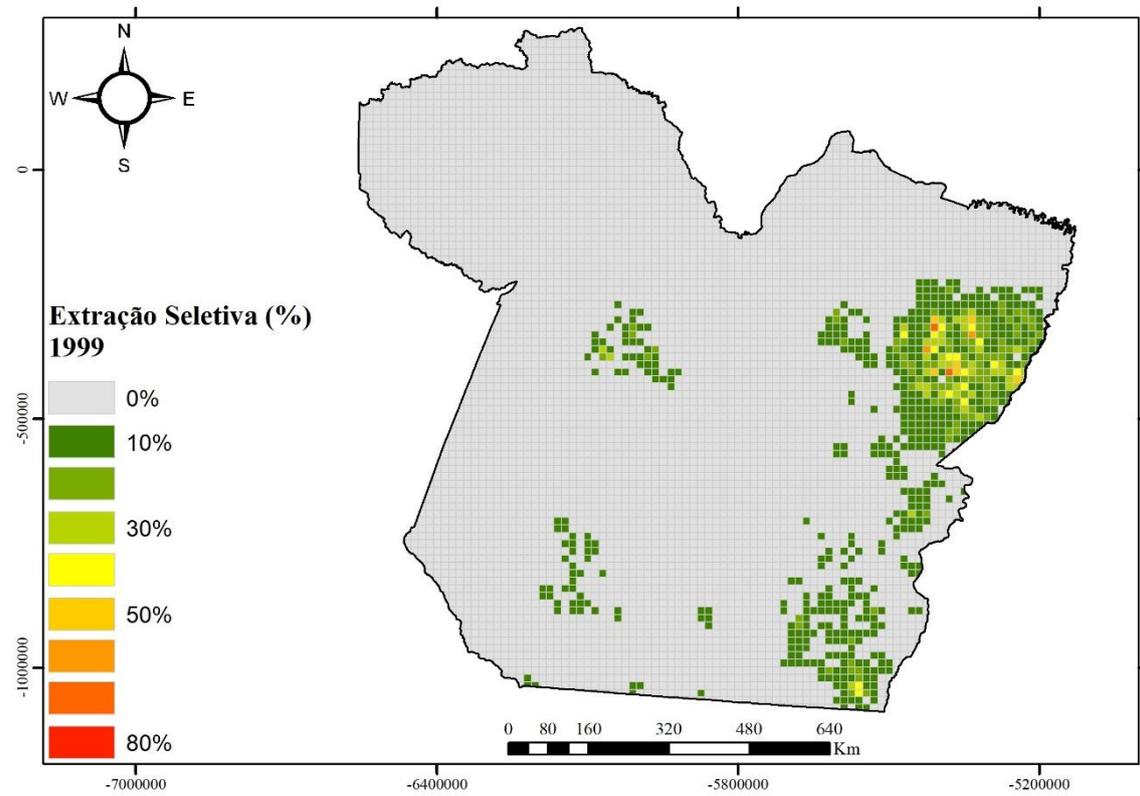
APÊNCICE A. Área de extração seletiva de madeira por ponto e órbita (1992 – 2018).

Área de extração seletiva Ponto e Órbita (km ²)								
Ponto / Órbita	1992	1996	1999	2003	2006	2010	2014	2018
222/061	-	-	0,68	2,91	16,15	10,27	45,81	70,43
222/062	643,11	987,13	1102,79	1114,67	1028,07	878,62	507,57	863,44
222/063	286,64	395,75	968,55	708,50	487,19	465,57	185,08	110,32
223/062	605,68	2038,52	3650,17	3968,54	3584,66	4832,18	2375,28	2189,76
223/063	355,65	1142,55	2349,01	3836,44	2986,36	3200,50	1510,73	1675,42
223/064	21,86	16,51	208,44	226,41	16,42	23,06	16,30	23,41
223/065	19,85	7,11	48,69	10,61	-	-	-	5,18
223/066	41,88	-	25,18	1,54	-	-	-	3,74
224/062	20,80	57,62	762,40	2273,68	2216,26	1227,30	1665,31	970,02
224/063	7,59	31,86	39,20	558,74	474,77	188,46	33,36	160,32
224/064	3,11	5,78	25,26	250,71	319,76	51,03	19,93	65,43
224/065	48,38	61,89	143,55	148,05	77,04	30,30	74,14	128,84
224/066	333,87	226,55	865,23	106,80	132,46	24,07	53,20	55,41
225/062	-	-	5,13	53,21	1124,95	285,91	519,34	482,25
225/063	-	-	-	90,30	123,01	34,86	33,60	32,76
225/064	-	-	-	2,15	16,07	7,17	26,04	57,66
225/065	-	-	1,90	-	-	5,54	18,92	22,32
225/067	-	-	-	-	-	-	-	-
226/061	-	-	-	7,86	116,31	194,28	380,71	230,37
226/062	-	43,98	57,00	428,31	673,88	277,10	607,55	452,79
226/063	5,03	37,52	14,06	30,56	21,43	4,61	67,65	60,86
226/066	-	-	28,48	41,37	45,14	71,21	203,29	55,41
227/061	-	-	-	0,85	-	44,86	178,82	70,31
227/062	-	-	377,30	276,01	693,37	208,26	710,26	304,14
227/063	-	-	1,28	119,09	173,68	149,06	42,40	98,13
227/064	-	-	4,21	427,83	365,10	83,09	47,17	283,10
227/065	-	-	95,56	312,87	270,99	105,21	354,04	177,55
227/066	-	-	9,86	200,15	147,51	68,70	58,04	43,50
228/061	-	-	-	3,25	-	84,30	156,00	411,42
228/062	-	-	-	5,85	67,86	235,94	313,46	679,10
228/063	-	-	-	79,15	73,91	103,16	238,78	84,68
228/064	-	-	-	35,21	107,31	165,22	206,24	93,09
228/065	-	-	0,01	22,05	26,65	29,46	27,93	39,87
228/066	-	-	6,79	34,11	33,67	36,69	33,45	36,19

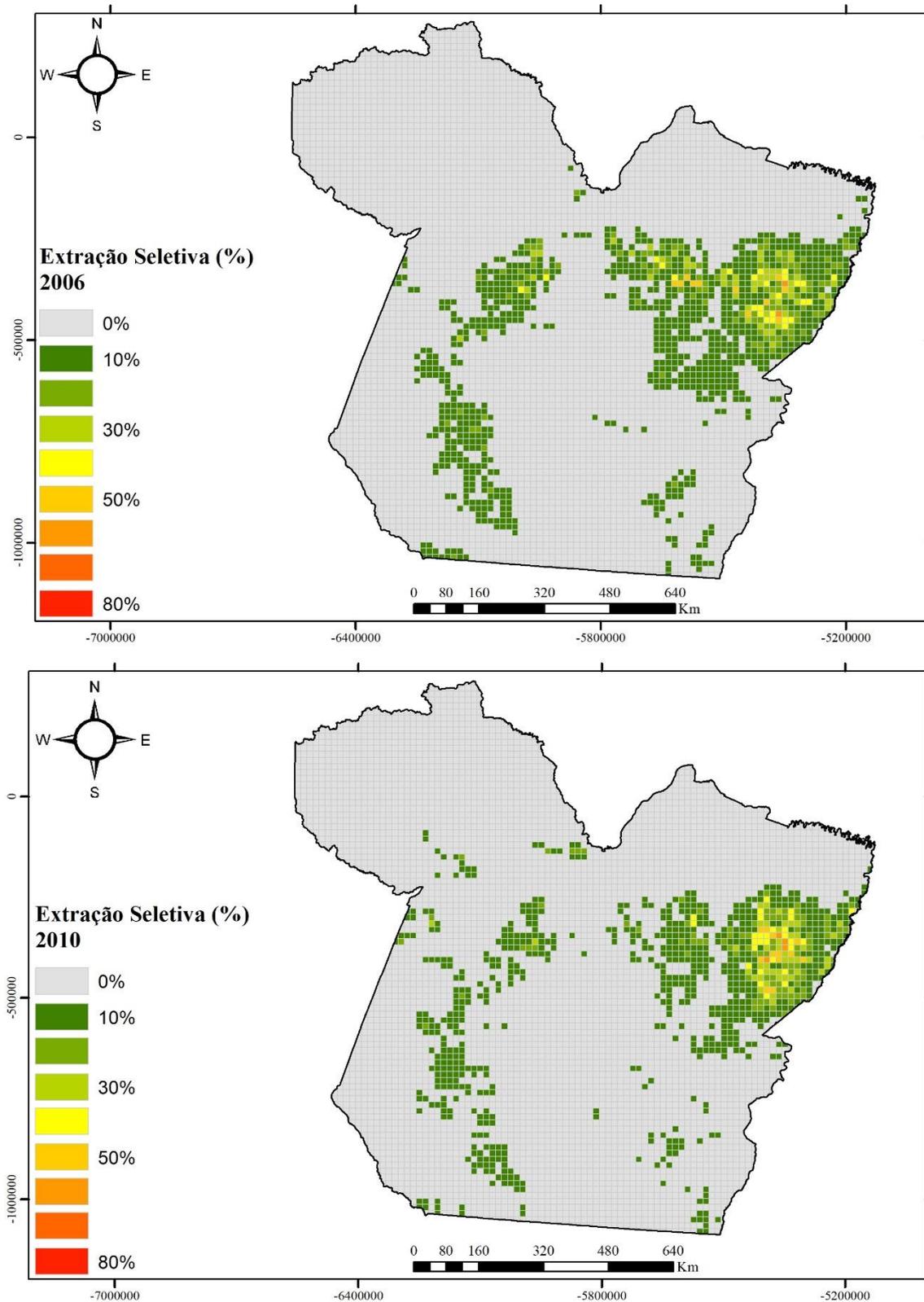
APÊNCICE B. Área de extração seletiva (%) no estado do Pará nos anos de 1992 e 1996 (Grade de 225 km²).



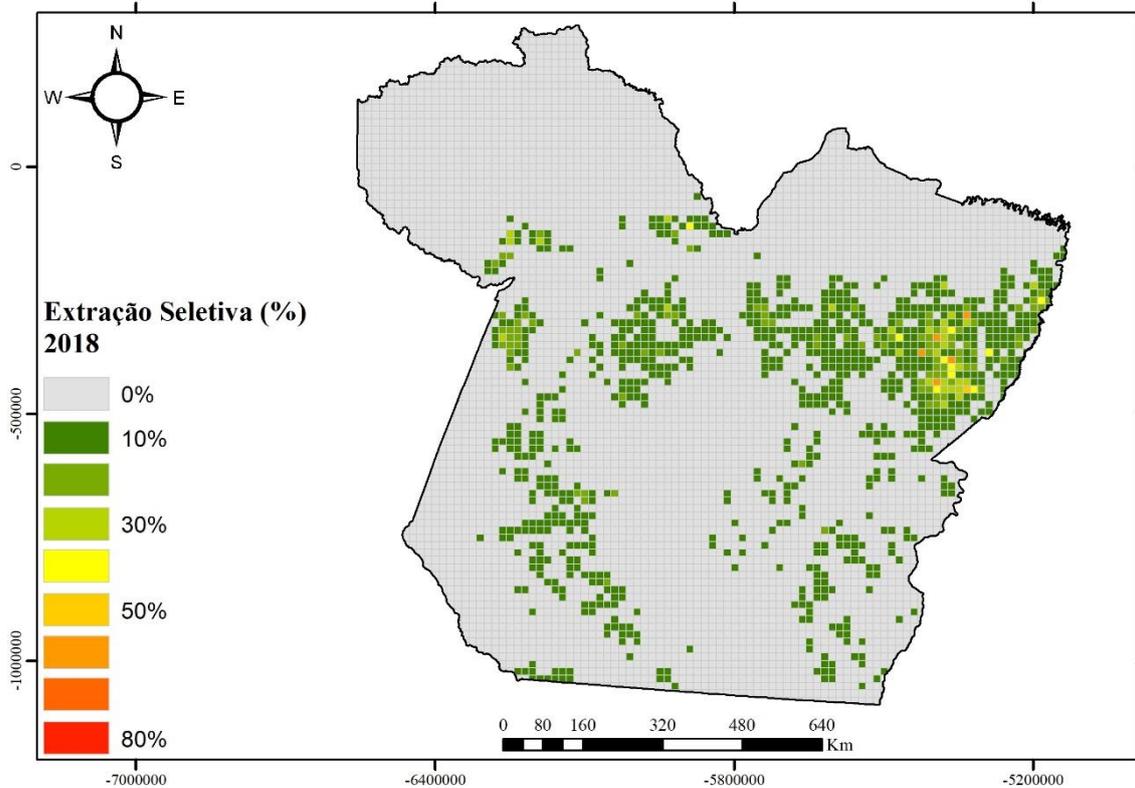
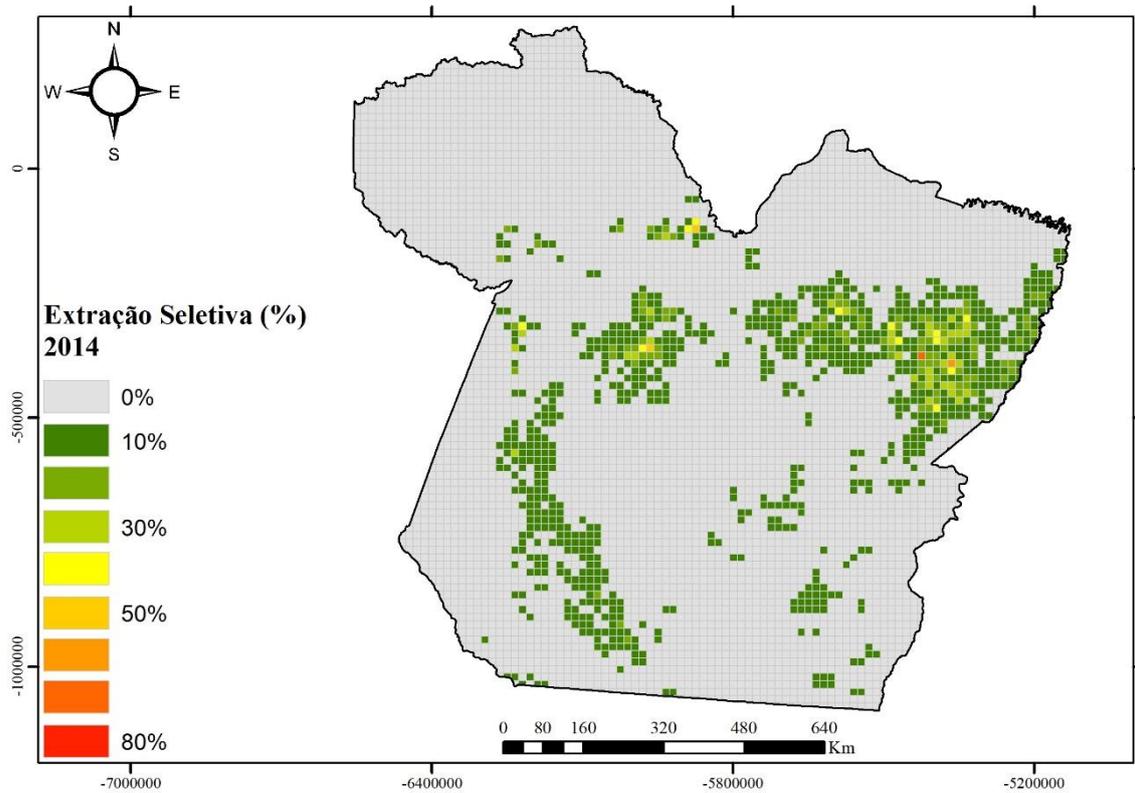
APÊNCICE C. Área de extração seletiva (%) no estado do Pará nos anos de 1999 e 2003 (Grade de 225 km²).



APÊNCICE D. Área de extração seletiva (%) no estado do Pará nos anos de 2006 e 2010 (Grade de 225 km²).



APÊNCICE E. Área de extração seletiva (%) no estado do Pará nos anos de 2014 e 2018 (Grade de 225 km²).



APÊNDICE F. Unidades de Conservação e Terras Indígenas no estado do Pará.