

**Embrapa**

*Amazônia Oriental*



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI  
EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**ADÊNIO MIGUEL SILVA DA COSTA**

**VULNERABILIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS NA  
MESORREGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM, PARÁ**

**BELÉM – PA  
2019**

**ADÊNIO MIGUEL SILVA DA COSTA**

**VULNERABILIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS NA  
MESORREGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM, PARÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com o Museu Paraense Emílio Goeldi e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária da Amazônia Oriental, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

Linha de pesquisa: Ecossistemas Amazônicos e Dinâmicas Socioambientais.

Orientadora: Profa. Dra. Aline Maria Meiguins de Lima

**BELÉM – PA  
2019**

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

---

C837v Costa, Adênio Miguel Silva da  
Vulnerabilidade dos recursos hídricos na mesorregião metropolitana de Belém, Pará / Adênio Miguel Silva da Costa. – 2019.

105 f. : il. color.

Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dra. Aline Maria Meiguins de Lima

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

1. Recursos hídricos. 2. Vulnerabilidade. 3. Mudanças de uso e cobertura da terra. 4. Sensoriamento remoto. 5. Pressão antrópica. I. Título.

CDD 621.3678

---

**ADÊNIO MIGUEL SILVA DA COSTA**  
**VULNERABILIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS NA MESORREGIÃO**  
**METROPOLITANA DE BELÉM, PARÁ.**

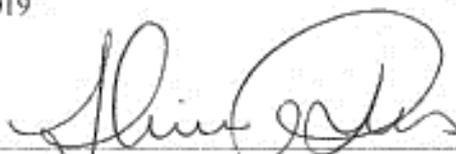
Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com o Museu Paraense Emílio Goeldi e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária da Amazônia Oriental, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e Dinâmica Sócio-Ambiental na Amazônia.

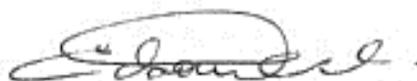
Linha de pesquisa: Ecossistemas Amazônicos e Dinâmica Socio-Ambiental.

Data de aprovação: 27 / 02 / 2019

Banca Examinadora:



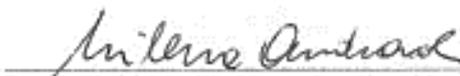
Dra. Anne Maria Meiguins de Lima – Orientadora  
Doutora em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido  
Universidade Federal do Pará – UFPA



Dr. Edson José Paulino da Rocha – Membro Interno  
Doutor em Meteorologia  
Universidade Federal do Pará – UFPA



Dr. Marcos Adatto – Membro Interno  
Doutor em Sensoriamento Remoto  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE



Dra. Milena Marília Nogueira de Andrade – Membro Externo  
Doutora em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido  
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

## AGRADECIMENTOS

Esses agradecimentos são direcionados a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o produto desta pesquisa, seja através de aspectos científicos, filosóficos e/ou emocionais, motivacionais etc., através do ensinamento diário em sala de aula ou da convivência cotidiana, suas contribuições foram igualmente valiosas.

A minha família, sem a qual não haveria razão para tal esforço, mãe (Simoni), vó (Antônia) e vô (Manoel), irmão (Celso Jr), tios (Rômulo e Sérgio), padrasto (Celso), pessoas que me possibilitaram ir muito além do óbvio.

A minha mulher Camila (“Diante da vastidão do tempo e da imensidão do Universo, é um imenso prazer para mim dividir um planeta e uma época com você”) e sua família (Dolores, Sandra, Paulo, Glau, Glei, Gisele, Gabriel, Dioguinho e vó Lourdes).

A minha orientadora, por dedicar parte significativa de seu tempo e atenção para melhorar este trabalho.

Aos meus professores no PPGCA: Aline Meiguins, Alessandro Carioca, Everaldo B. Souza, Edson J. P. da Rocha, Aurora Mota, Isabel Vitorino, Bruno S. Godoy, Igor Narvaes, Ima Vieira, Joice Ferreira, Márcia Pimentel, Lourdes Ruivo, Marcos Adami, Peter M. de Toledo, Steel Vasconcelos, André Cutrim, Otávio Canto, Norbert Fenzl e Ronaldo Mendes, por me concederem um pouco de seu conhecimento.

A todos os colegas da Turma de Mestrado de 2017.

Aos membros da Banca, por suas valiosas contribuições.

As instituições que promoveram esse programa de pós-graduação, a Universidade Federal do Pará, o Museu Emílio Goeldi, a Embrapa, o Instituto de Geociências e a secretária do PPGCA.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos em grande parte dessa pesquisa.



*O lugar onde as pessoas vivem é muito maior do que apenas as suas casas, também é o lugar onde elas convivem, uma com as outras e com o ambiente. O meio ambiente não é somente aquilo que nos cerca, pois, nós somos parte integrante dele. Essa dinâmica é complexa, estudá-la não depende somente de nossos sentidos, daquilo que estamos vendo em um determinado instante. Necessita da história daquele território, de instrumentos sofisticados como os satélites, de medições precisas tanto o quanto forem possíveis e muita reflexão, múltiplas formas de ver o problema, várias visões de um mesmo ponto e vários pontos de uma mesma visão.*

*De uma área longínqua na periferia de Ananindeua podemos ver a vastidão da paisagem metropolitana, o concreto e o asfalto crescem na direção do centro da capital paraense que se ergue ao fundo sob um mar de densas nuvens. Ao mesmo tempo que a relação sociedade-natureza nos encanta, também, nos preocupa com as suas contradições, causa do sofrimento diário da população, na distribuição de água, de energia, ausência de saneamento, alagamentos sazonais, acúmulo de resíduos sólidos e muitos outros.*

*Nessa oportunidade, devemos repensar o meio ambiente que queremos ser: sujo ou limpo? Perturbado ou equilibrado? Vulnerável ou resiliente? O meio ambiente não é linear de forma a ser sempre previsível e facilmente mensurável, mas ele é sustentável, aproveitando o máximo e desperdiçando o mínimo, devemos seguir o seu exemplo.*

Adênio Miguel  
Ananindeua, 30 de janeiro de 2019

## RESUMO

A vulnerabilidade dos recursos hídricos (VRH) foi analisada sob três escalas cartográficas distintas, através da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto sobre diferentes produtos de sensores, TM/Landsat-5 e 8 para as cidades, RapidEye para as mesobacias e ortofotos para as microbacias. Através de uma abordagem híbrida, primeiramente, pela utilização dessas imagens e, também, pela aplicação das técnicas de classificação supervisionada MaxVer e GeoBIA. Um dos parâmetros de estudo da VRH derivou dos resultados dessas análises, que foram as mudanças de uso e cobertura da terra (LUCC). O outro parâmetro, a Pressão Antrópica. A VRH foi resultado da álgebra de mapas desses dois parâmetros. O diagnóstico multitemporal da MRMB mostrou a tendência de aumento das classes de uso da terra, Não Floresta (NF) e Áreas Antrópicas (AA), de modo geral, com a diminuição das classes de cobertura da terra, Floresta (FL) e Formações Secundárias (FS), destacando-se o período de 1994 a 2017, onde FS reduziu em 1.234,04 km<sup>2</sup> e NF aumentou 554,79 km<sup>2</sup>. Também, classes para o parâmetro de pressão foram definidas, de forma a associá-las numericamente com as de LUCC, onde, o algoritmo de quebras naturais foi aplicado. Identificou-se a redução de FL nas quatro microbacias para o período de 2011 a 2015, chegando ao quantitativo de 35,21 km<sup>2</sup> na bacia do rio Caraparu, 18,47 km<sup>2</sup> para Guajará-Açu, 24,12 km<sup>2</sup> para a do Tauá e 0,75 km<sup>2</sup> para a do Apeú. Nas microbacias, FL e AA foram predominantes, na qual as bacias do Ariri e Maguari-Açu foram mais impactadas, com 60,88% e 54,55%, respectivamente, de seus territórios ocupados por AA. Para justificar tais alterações na paisagem, *drivers* (fatores) de mudança foram apontados e discutidos. O estudo da VRH revelou que nas mesobacias houve diminuição das áreas de vulnerabilidade com grau baixo e aumento das de grau moderado, com destaque para a bacia do Apeú em que a primeira diminuiu em 10,94% e a última aumentou em 12,21%. Para as microbacias, considerando a soma das classes dos graus Alto e Muito Alto, Ariri apresentou 36,45% e Maguari-Açu 45,59%. De modo semelhante, os grupos de bacias apresentaram regiões de maior grau de VRH mais próximas dos cursos d'água de menor extensão, até 30 m, assim como, de suas nascentes. As Análises Complementares contribuíram no sentido de visualização do problema de outra perspectiva, como a fragmentação crescente das florestas, como também a vulnerabilidade das áreas circunvizinhas dos rios, as APP.

Palavras-chave: Mudanças de uso e cobertura da terra. Sensoriamento remoto. Abordagem híbrida. Pressão Antrópica.

## ABSTRACT

The vulnerability of water resources (VRH) was analyzed under three different cartographic scales, applying remote sensing techniques on different sensor products, TM/Landsat-5 and 8 for cities, RapidEye for mesobacias and orthophotos for micro catchments. Through a hybrid approach, first, by the use of these images and, also, by the application of supervised classification techniques MaxVer and GeoBIA. One of the VRH study parameters derived from the results of these analyzes, which was the LUCC. The other parameter, the Anthropogenic Pressure. VRH was the result of map algebra of these two parameters. The multitemporal diagnosis of MRMB in the years of 1984, 1994, 2008 and 2017, showed the tendency of increasing the classes of land use, Non Forest (NF) and Anthropic Areas (AA), in general, with the decrease of the classes of land cover, Forest (FL) and Secondary Formations (SF), with emphasis on the period from 1994 to 2017, where FS decreased by 1,234.04 km<sup>2</sup> and NF increased by 554.79 km<sup>2</sup>. Also, classes for the pressure parameter were defined, in order to associate them numerically with those of LUCC, where the algorithm of natural breaks was applied. It was identified the reduction of FL in the four micro catchments for the period from 2011 to 2015, reaching a quantitative of 35.21 km<sup>2</sup> in the Caraparu river basin, 18.47 km<sup>2</sup> for Guajará-Açu, 24.12 km<sup>2</sup> for Tauá and 0.75 km<sup>2</sup> for that of Apeú. In the watersheds, FL and AA were predominant, in which the Ariri and Maguari-Açu basins were most impacted, with 60.88% and 54.55%, respectively, of their territories occupied by AA. To justify such changes in the landscape, drivers of change were pointed out and discussed. The VRH study revealed that in the Mesobacias there was a decrease in areas of vulnerability with low degree and increase of moderate degree, with emphasis on the Apeú basin, where the first one decreased by 10.94% and the last increased by 12.21%. For the micro catchments, considering the sum of the classes of the High and Very High grades, Ariri presented 36.45% and Maguari-Açu 45.59%. Similarly, the groups of basins presented regions of higher degree of VRH closer to the smaller watercourses, up to 30 m, as well as their sources. The Complementary Analyzes contributed towards the visualization of the problem in another perspective, such as the increasing fragmentation of the forests, as well as the vulnerability of the surrounding areas of the rivers, the APP.

**Keywords:** Land use change and land cover. Remote sensing. Hybrid approach. Anthropogenic Pressure.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutural conceitual-organizacional da Dissertação.....	17
Figura 2 - Estágios de transição de uso da terra.....	24
Figura 3 - Taxas anuais de desmatamento na Amazônia Legal (1988-2018) .....	25
Figura 4 - Exemplo de comportamento espectral de alvos e bandas de sensores remoto. ....	28
Figura 5 - Diferença de resolução espacial entre imagens de sensores.....	29
Figura 6 - Localização dos municípios que compõem a MRMB.....	31
Figura 7 - Localização das bacias hidrográficas estudadas.....	32
Figura 8 - Fluxograma da metodologia.....	34
Figura 9 - Chave de classificação e descrição das classes de uso e cobertura da terra.....	40
Figura 10 - Exemplos de elementos da paisagem na MRMB.....	41
Figura 11 - Imagem TM/Landsat-5 mostrando as amostras de treinamento.....	42
Figura 12 - Imagens com diferentes parâmetros de escala.....	43
Figura 13 - Distribuição espacial das classes de Pressão Antrópica para a MRMB.....	47
Figura 14 - Representação da operação de adição em Álgebra de Mapas.....	49
Figura 15 - Comparação entre ZEE e os graus de VRH.....	51
Figura 16 - Elementos da paisagem em imagem RapidEye de Santa Izabel do Pará.....	54
Figura 17 - Variação das classes de uso e cobertura da terra na MRMB, em km <sup>2</sup> .....	59
Figura 18 - Distribuição espaço-temporal das classes de uso e cobertura da terra.....	59
Figura 19 - Agrupamento das classes de LUCC na MRMB, em km <sup>2</sup> .....	60
Figura 20 - Distribuição das classes do TerraClass, em km <sup>2</sup> .....	61
Figura 21 - Dados do TerraClass agrupados pelas classes de LUCC, em km <sup>2</sup> .....	63
Figura 22 - Pressão Antrópica nas Mesobacias.....	65
Figura 23 - Pressão Antrópica nas Microbacias.....	66
Figura 24 - Uso e Cobertura da Terra nas Mesobacias, em km <sup>2</sup> .....	67
Figura 25 - LUCC nas mesobacias do Apeú e Caraparu.....	68
Figura 26 - LUCC nas mesobacias do Guajará-Açu e Tauá.....	69
Figura 27 - Uso e Cobertura da Terra nas Microbacias, em km <sup>2</sup> .....	70
Figura 28 - Elementos de uso e cobertura da terra na região da bacia do Ariri.....	71
Figura 29 - Distribuição das classes de LUCC para as microbacias.....	72
Figura 30 - Malha viária, localidades e sedes municipais da MRMB.....	74
Figura 31 - Aglomerados subnormais na MRMB.....	75
Figura 32 - Área consolidada das propriedades rurais.....	76

Figura 33 - Unidades de conservação na MRMB.....	78
Figura 34 - VRH nas mesobacias dos rios Apeú e Caraparu.....	79
Figura 35 - VRH nas mesobacias dos rios Guajará-Açu e Tauá. ....	80
Figura 36 - Quantitativo dos graus de vulnerabilidade nas mesobacias.....	81
Figura 37 - Variação percentual dos graus de VRH nas mesobacias de 2012 para 2015. ....	82
Figura 38 - Vulnerabilidade dos recursos hídricos nas microbacias. ....	83
Figura 39 - Quantitativo da vulnerabilidade dos recursos hídricos nas microbacias. ....	84
Figura 40 - Áreas de conflito de uso da terra nas APP das mesobacias, em hectares. ....	88
Figura 41 - Áreas de conflito de uso da terra nas APP das microbacias, em hectares. ....	89
Figura 42 - Graus de VRH nas APP das microbacias, em hectares. ....	91
Figura 43 - LUCC e VRH na APP de 30 m e de nascentes na mesobacia do Apeú. ....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução demográfica dos municípios da MRMB (1970-2017). .....	19
Tabela 2 - Área total e porcentagem ocupada pelas bacias por município.....	32
Tabela 3 - Fundamentos da base de dados geoespacial.....	35
Tabela 4 - Características de interesse das bandas dos sensores TM e OLI.....	37
Tabela 5 - Classes de Pressão Antrópica. ....	45
Tabela 6 - Distribuição quantitativa das classes de Pressão Antrópica para a MRMB. ....	47
Tabela 7 - Ponderação das variáveis que definem a VRH. ....	49
Tabela 8 - Classificação dos graus de VRH. ....	51
Tabela 9 - Métricas de paisagem utilizadas.....	55
Tabela 10 - Faixas marginais mínimas de APP.....	56
Tabela 11 - Associação entre as classes de LUCC e do TerraClass.....	62
Tabela 12 - Limites superiores das classes de Pressão Antrópica. ....	64
Tabela 13 - Área ocupada pelos aglomerados subnormais nas microbacias. ....	75
Tabela 14 - Áreas consolidadas nas bacias.....	77
Tabela 15 - Lista de unidades de conservação presentes na MRMB. ....	77
Tabela 16 - Métricas de paisagem para as mesobacias. ....	86
Tabela 17 - Métricas de paisagem para as microbacias.....	87
Tabela 18 - Graus de VRH por APP das mesobacias, em hectares, em 2012 e 2015. ....	90

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APP	Área de Preservação Permanente
CAR	Cadastro Ambiental Rural
CENSIPAM	Centro Gestor e Operacional do Sistema de Vigilância da Amazônia
GeoBIA	<i>Geographic Object-Based Image Analysis</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
MaxVer	Máxima Verossimilhança
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MLME	Modelo Linear de Mistura Espectral
MRMB	Mesorregião Metropolitana de Belém
ONU	Organização das Nações Unidas
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PPCDAm	Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal
PRODES	Programa Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite
RMB	Região Metropolitana de Belém
OBIA	<i>Object-Based Image Analysis</i>
TM	Thematic Mapper
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
LANDSAT	<i>LAND SATellite</i>
GIS	<i>Geographical Information System</i>
REIS	<i>RapidEye Earth Imaging System</i>
LUCC	<i>Land Use and Cover Change</i>
PA	Pressão Antrópica
PDI	Processamento Digital de Imagens
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VRH	Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos
ZEE	Zoneamento Ecológico-Econômico
A	Área
2P	Perímetro
km	Quilômetro
km <sup>2</sup>	Quilômetro quadrado
km <sup>2</sup> .ano <sup>-1</sup>	Quilômetro quadrado por ano
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
ha	Hectare
hab./km <sup>2</sup>	Habitantes por quilômetro quadrado

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>1.1</b>	<b>Contexto do Problema de Pesquisa</b> .....	13
<b>1.2</b>	<b>Justificativa, Objeto de Estudo e Hipótese de Trabalho</b> .....	15
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b> .....	16
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	18
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	18
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	18
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	19
<b>3.1</b>	<b>Formação Territorial do Espaço Metropolitano de Belém</b> .....	19
<b>3.2</b>	<b>Vulnerabilidade(s) e Recursos Hídricos</b> .....	20
<b>3.3</b>	<b>Mudanças de Uso e Cobertura da Terra</b> .....	23
<b>3.4</b>	<b>Sensoriamento Remoto do Meio Ambiente</b> .....	27
<b>4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	30
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	34
<b>5.1</b>	<b>Base de Dados Geoespacial</b> .....	35
<b>5.2</b>	<b>Abordagem Híbrida: Sensores Remotos</b> .....	36
<b>5.3</b>	<b>Abordagem Híbrida: Classificação Supervisionada</b> .....	39
<b>5.4</b>	<b>Pressão Antrópica e Grade Estatística do IBGE</b> .....	44
<b>5.5</b>	<b>Determinação e Análise da Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos</b> .....	48
<b>5.6</b>	<b>Análises Complementares</b> .....	53
5.6.1	Estrutura da Paisagem.....	53
5.6.2	Zona Ripária e Conflitos de Ocupação em APP.....	55
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	58
<b>6.1</b>	<b>Mudanças de Uso e Cobertura da Terra na MRMB</b> .....	58
<b>6.2</b>	<b>Resultados dos Parâmetros de Vulnerabilidade</b> .....	64
6.2.1	Zonas de Pressão Antrópica nas Bacias Hidrográficas.....	64
6.2.2	Uso e Cobertura da Terra nas Bacias Hidrográficas.....	66
6.2.3	Identificação dos <i>Drivers</i> de Mudança da Paisagem.....	73
<b>6.3</b>	<b>Estudo da Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos</b> .....	78
<b>6.4</b>	<b>Análises Complementares</b> .....	85
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES</b> .....	93
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	96

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto do Problema de Pesquisa

Como tema central, a teoria de estudo da vulnerabilidade abrange muitos entendimentos inter-relacionados, como o de adaptação, capacidade adaptativa, resiliência, risco, perigo e outros, discutidos mais adiante neste texto, entre os conceitos fundamentais mencionam que “a vulnerabilidade de qualquer indivíduo ou grupo social para alguma forma particular de perigo natural é determinado pelo seu estado existente, isto é, pela sua capacidade de responder a esse perigo” (KELLY; ADGER, 2000).

Nesse âmbito, mudanças climáticas, eventos extremos, produção de alimentos e de energia, saneamento básico, epidemias, perda de habitats e de biodiversidade estão entre os problemas ambientais, sociais e econômicos de maior relevância na atualidade. Direta ou indiretamente, essas são questões ligadas a água, ou em uma conceituação mais específica aos recursos hídricos. Um exemplo dessa preocupação são os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU), estabelecidos em 2015, como resultado dos debates da RIO+20. Dezessete objetivos com cento e sessenta e nove metas a serem atingidas até o ano de 2030 foram definidas. Entre os objetivos destaca-se o de número seis “assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos”, que, entre outros, tem por meta “até 2030, assegurar o acesso universal e equitativo a água potável e segura para todos” (UN, 2015).

Do ponto de vista da sociedade, a problemática dos recursos hídricos envolve a sua disponibilidade em qualidade e quantidade adequadas para suprir a demanda da população. No contexto do ambiente, os ecossistemas dependem do funcionamento e regulação do ciclo hidrológico. E, a água como recurso natural é vista como recurso hídrico, de valor estratégico para a economia global, principalmente, para a agricultura responsável por utilizar 70% da água consumida no planeta (CASARIN; SANTOS, 2011; HESPANHOL, 2008; TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2011).

Na conjuntura da necessidade de um novo paradigma para a gestão dos recursos hídricos, a Amazônia é uma região crítica para o Brasil. A maior bacia hidrográfica do mundo, com 7.049.980 de km<sup>2</sup> de extensão e vazão média de 3.767,8 km<sup>3</sup>/ano (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, *op. cit.*), tem sua história marcada pelo conflito entre os anseios do desenvolvimento

local e os interesses de fora da região, até internacionais. Os grandes projetos minerais, hidroelétricos e de infraestrutura viária proporcionaram modificações marcantes na estrutura da sociedade, com efeitos sobre o meio ambiente. Nesse panorama geopolítico, os recursos hídricos têm o potencial de serem a nova fronteira de exploração da região no século XXI (BECKER, 2005; GONÇALVES, 2015).

Durante esse processo núcleos urbanos se formaram na Amazônia e a partir disso novas relações foram estabelecidas (BECKER, 2013). A área de estudo deste trabalho, a Mesorregião Metropolitana de Belém (MRMB), situando-se nesse contexto, teve seu processo de urbanização recente, a partir da década de 1960, influenciado por fatores tanto de natureza local quanto regional (TRINDADE JR., 2016). Assim, a urbanização e, conseqüentemente, o aumento populacional favoreceram a degradação dos recursos naturais, onde, a investigação focará nos seus efeitos sobre os recursos hídricos, na unidade das bacias hidrográficas, a partir das mudanças ocorridas na paisagem.

O nordeste paraense como um todo é um bom exemplo disso. Uma das fronteiras mais antigas de ocupação da Amazônia, essa região passou por eventos de grande fluxo migratório de pessoas e circulação de bens de consumo, com a integração realizada pela Estrada de Ferro Belém-Bragança, eixo sobre o qual os núcleos urbanos se formaram. A ação antrópica acelerou o desmatamento da região, com o intenso fluxo migratório de entrada, sendo o extrativismo madeireiro, a extração mineral e a agropecuária decisivos para as mudanças na paisagem (CORDEIRO *et al.*, 2017).

Os estudos de vulnerabilidade quanto a diversas causas, como as citadas no início desse capítulo, vêm crescendo à medida que as populações se tornam mais susceptíveis a esses eventos ou os mesmos ficam mais intensos e frequentes (ADGER, 2006). Portanto, o objetivo da pesquisa é analisar a vulnerabilidade dos recursos hídricos na MRMB, com uma abordagem constituída na aplicação de técnicas de geoprocessamento, sobre produtos de sensores remoto distintos em resolução espacial e distribuição temporal. Então, almeja-se fornecer informações sobre essa problemática no nível intermunicipal e de diferentes formas de bacias hidrográficas.

Desta forma, o desenvolvimento metodológico ocorre em três partes bem definidas e complementares, uma na área de estudo como um todo e as demais em bacias de pequena e média dimensão territorial. Assim, o cerne das Ciências Ambientais que é a interdisciplinaridade será fundamentado nas discussões que seguiram aos resultados pretendidos, pois, a compreensão dos fenômenos complexos que ocorrem na paisagem metropolitana é alvo de estudo

de vários campos da Ciência. A Geografia física e política, a Ecologia da paisagem, a Cartografia e as geotecnologias de uma forma geral, fornecem os elementos necessários para uma visão sistêmica de uma questão como essa (PHILIPPI JR. *et al.*, 2000).

## 1.2 Justificativa, Objeto de Estudo e Hipótese de Trabalho

A complexidade do estudo da vulnerabilidade engloba diversos níveis de diagnóstico, que assumem nomenclaturas diversas de acordo com o objeto de estudo, como, por exemplo, vulnerabilidade natural, ambiental, social, climática, costeira, a desastres naturais e outras (MARENGO; SCARANO, 2016). De acordo com Adger (2006) e Eakin e Luers (2006), essa diversidade de abordagens mais contribui do que prejudica o avanço dessa linha de pesquisa, pois, as diversas visões do tema acabam, na maioria dos casos, por serem complementares, como será discutido mais adiante.

A importância da pesquisa reside na sua contribuição para o estudo da vulnerabilidade no meio urbano, através do fornecimento de informações para uma abordagem dessa questão crítica para o desenvolvimento. O campo da *Vulnerabilidade das Cidades*, como tratado por Pelling (2003), relaciona as mudanças que ocorrem no meio urbano, pelo processo histórico de urbanização, com suas consequências para a exposição da população a desastres naturais, assim como, sua capacidade resiliência e os fatores políticos e socioeconômicos que a influenciam.

O objeto de estudo é a vulnerabilidade dos recursos hídricos. Sua delimitação compreende três níveis de análise espaço-temporal em que o problema se apresenta. A Mesorregião Metropolitana de Belém (MRMB), e os municípios que a constituem, representa o nível superior de análise, o qual tem por objetivo contextualizar a problemática no seu panorama geral, mostrar como e o quanto o fenômeno das mudanças de uso e cobertura da terra é percebido quando olhado de uma escala mais ampla, com menos detalhes, porém, com maior representação de área.

As bacias hidrográficas, unidades territoriais de planejamento dos recursos hídricos, constituem-se em outro nível de análise principal da vulnerabilidade, onde, a abordagem multicritério fornece o entendimento da complexidade do problema, a partir da caracterização da distribuição espacial das classes pré-definidas de vulnerabilidade dos recursos hídricos. A adoção de bacias de dimensões distintas fornece o alicerce para uma contribuição holística ao estudo da vulnerabilidade, de forma a apresentar resultados que integrem o panorama geral de investigação, que é o da MRMB.

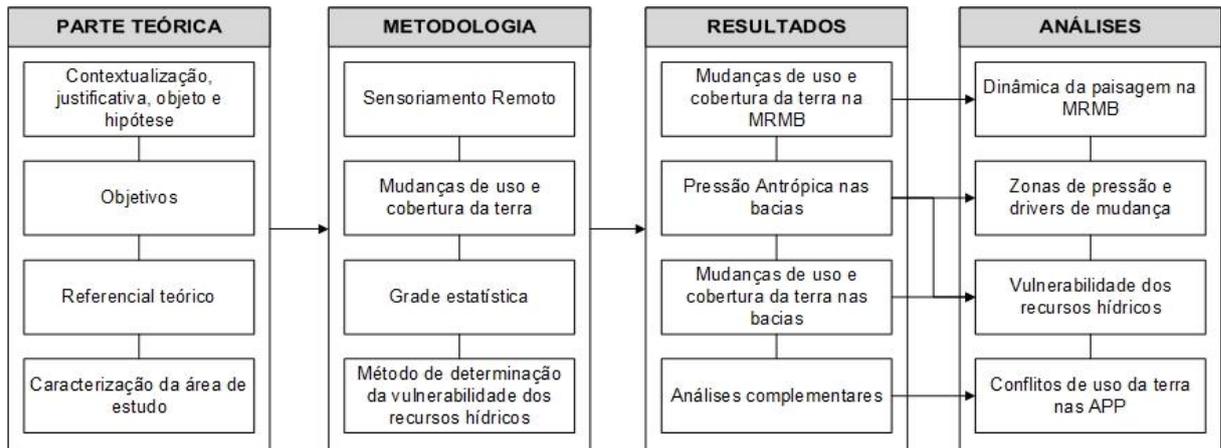
A questão norteadora pode ser resumida na forma da seguinte interrogação: *como o processo de formação territorial do espaço geográfico metropolitano afetou os recursos hídricos em relação a sua vulnerabilidade?* A hipótese principal é de que a expansão dos núcleos urbanos das cidades de forma desordenada nas últimas décadas ocasionou transformações na paisagem, favorecendo a intensificação da vulnerabilidade dos recursos hídricos, a partir de alterações nas formas de cobertura para as de uso da terra.

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

Após a apresentação inicial do tema de pesquisa no *Capítulo 1* e a definição de seus objetivos no *Capítulo 2*, é apresentada a Fundamentação Teórica no *Capítulo 3*. O conteúdo dessa seção oferece o alicerce sobre o qual o tema é sustentado, a partir da explanação do processo de formação histórico da área de estudo, seguida pelo entendimento do tema da vulnerabilidade e sua aplicação na área dos recursos hídricos, assim como, do papel das mudanças de uso e cobertura da terra sobre essa temática e sua abordagem em sensoriamento remoto.

O *Capítulo 4* descreve em detalhes a Área de Estudo, onde as unidades subsequentes de análise estão inseridas, as bacias hidrográficas, desde as suas características físicas até a sua estrutura socioeconômico, passada e atual. O *Capítulo 5* traz a metodologia estabelecida, com a abordagem híbrida em sensores remotos e métodos de classificação supervisionada, até o estabelecimento dos parâmetros usados para determinar e analisar a vulnerabilidade dos recursos hídricos. Os resultados, as análises e as interpretações são apresentadas e discutidas no *Capítulo 6*. Na parte final do trabalho, *Capítulo 7*, é feita uma síntese do que foi exposto, com conclusão geral e recomendações para o problema estudado. A Figura 1 mostra o percurso estrutural da pesquisa.

Figura 1 - Estrutural conceitual-organizacional da Dissertação.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Analisar espacialmente a vulnerabilidade dos recursos hídricos na Mesorregião Metropolitana de Belém (MRMB), no contexto de bacias hidrográficas de diferentes dimensões espaciais, considerando o aspecto multitemporal das modificações da paisagem e as distintas escalas de representação cartográfica, a partir de técnicas de sensoriamento remoto.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar a dinâmica e estrutura da paisagem na MRMB a partir das mudanças no uso e cobertura da terra, identificando os vetores de desmatamento e seus impactos sobre a hidrografia e zonas ripárias;
- Estudar as bacias hidrográficas de diferentes dimensões como unidades de planejamento para determinar e analisar a vulnerabilidade dos recursos hídricos, que associe o parâmetro socioeconômico, na forma da densidade populacional, para o entendimento da ação antrópica com o parâmetro de mudanças de uso e cobertura da terra;
- Realizar análises complementares a partir dos resultados do estudo de vulnerabilidade dos recursos hídricos das bacias hidrográficas, por meio da estrutura da paisagem através de métricas e da determinação de regiões de conflito em áreas de preservação permanente.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Formação Territorial do Espaço Metropolitano de Belém

A formação territorial metropolitana é resultado de um longo processo de modificação espacial caracterizado por acontecimentos marcantes na história do estado do Pará. Pode-se tomar como ponto de partida o final só século XVI e início do XVII, com destaque para a fundação de Belém em 1616. O século seguinte se caracteriza pela criação de núcleos coloniais no litoral paraense e ao longo do rio Amazonas. E no século XIX ocorrem o movimento da Cabanagem (1835-1840) e a exploração da borracha (TAVARES, 2008).

Para esta pesquisa o período de maior interesse se situa a partir das décadas de 1950 e 1960 até os dias atuais. A construção de Estrada de Ferro Belém-Bragança (concluída em 1908), os projetos desenvolvimentistas dos anos 1950, como a construção da rodovia Belém-Brasília (BR-010), a criação da Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM), antes chamada Superintendência para Valorização Econômica da Amazônia (SPVEA), em 1953, entre outros, são fatores que provocaram a municipalização do Pará, ou seja, incentivaram a formação de municípios em sua área de influência; houve então a dispersão do centro de Belém para as cidades vizinhas induzida por esses e outros motivos (TAVARES, 2008; TRINDADE JR., 2016). Esse processo proporcionou um crescimento demográfico aos municípios que compõem a MRMB, mais que triplicando a sua população entre 1970 e 2010 (Tabela 1).

Tabela 1 - Evolução demográfica dos municípios da MRMB (1970-2017).

<b>Municípios</b>	<b>1970</b>	<b>1980</b>	<b>1991</b>	<b>2000</b>	<b>2010</b>	<b>2018*</b>
Belém	633.374	933.280	1.244.689	1.280.614	1.393.399	1.485.732
Ananindeua	22.527	65.878	88.151	393.569	471.980	525.566
Castanhal	37.910	65.246	102.071	134.496	173.149	198.294
Marituba	n/d	n/d	n/d	74.429	108.246	129.321
Barcarena	17.498	20.015	45.946	63.268	99.859	122.294
Santa Izabel do Pará	15.848	24.044	33.329	43.227	59.466	69.746
Benevides	13.867	22.315	68.465	35.546	51.651	61.689
Santo Antônio do Tauá	10.919	11.460	17.128	19.835	26.674	31.038
Bujaru	15.735	25.992	14.117	21.032	26.695	28.832
Santa Bárbara do Pará	n/d	n/d	n/d	11.378	17.141	20.704
Inhangapi	6.610	7.333	6.668	7.681	10.037	11.559
<b>MRMB</b>	<b>774.288</b>	<b>1.175.563</b>	<b>1.620.564</b>	<b>2.085.075</b>	<b>2.438.297</b>	<b>2.684.775</b>

Fonte: Elaborado com base em IBGE (2010a) e IBGE (2017a). n/d: dado não disponível. \*Estimado.

No panorama nacional de institucionalização de regiões metropolitanas nos anos 70, a Região Metropolitana de Belém (RMB), com apenas as cidades de Belém e Ananindeua, foi instituída pela Lei Federal nº 14 de 1973. Em 1995, através da Lei Estadual nº 27, foram incorporados os municípios de Benevides, Marituba e Santa Bárbara. Santa Izabel do Pará e Castanhal foram anexados pelas Leis Estaduais nº 72/2010 e 76/2011, respectivamente (VELOSO; TRINDADE JR., 2014).

Já a divisão em Mesorregiões foi adotada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a partir de 1990, incluindo mais quatro cidades na RMB que são Barcarena, Bujaru, Inhangapi e Santo Antônio do Tauá (IBGE, 1990).

A formação metropolitana ou fase de metropolização de Belém e suas adjacências incorporou consequências críticas do ponto de vista socioeconômico e ambiental. Trindade Jr. (2016) cita como exemplos, a intensificação do êxodo rural, aumento de áreas de segregação periféricas localizadas nas “baixadas”, por consequência, problemas de infraestrutura, habitação, saúde, saneamento e drenagem urbana. Além disso, há as modificações na paisagem do nordeste paraense, impulsionadas pela intensificação da ocupação humana, com perda de habitats e biodiversidade, favorecendo a formação de florestas secundárias em diferentes estágios de sucessão, áreas degradadas, culturas agrícolas e pastagens (VIEIRA *et al.*, 2007).

### **3.2 Vulnerabilidade(s) e Recursos Hídricos**

Esta seção se dedicará a apresentar a construção histórica do entendimento sobre a vulnerabilidade, assim como, especificar os diversos meios pelo qual esse tema se apresenta, na forma da abordagem que é dada a cada objeto de estudo; bem como, enquadrar a vulnerabilidade dos recursos hídricos como um novo caminho para o entendimento dessa questão complexa.

Um conceito inicial diz que a vulnerabilidade (*vulnerability*) é definida como o potencial de perda, seja em função da exposição a riscos ou a propensão à ocorrência de eventos adversos (CUTTER, 2011). Outro, fala no comportamento adverso de parte ou todo um sistema quando sobre ele incide um fenômeno perigoso (PROAG, 2014). E ainda, um terceiro menciona que as diversas conceituações são convergentes a mencionar a vulnerabilidade como resultado de um evento estressante sobre o qual um sistema, socioeconômico ou socioecológico, é exposto e sua sensibilidade e capacidade de adaptação a esse (ADGER, 2006). Variações desse conceito incluem as vulnerabilidades ambiental, natural, costeira, climática e socioeconômica;

em ambos há o contexto de risco e perigos associados a danos inerentes (MARENGO; SCARANO, 2016). Outra conceituação, já na década de 1990, diz que “a vulnerabilidade é a probabilidade de um indivíduo ou grupo estar exposto e prejudicado por um perigo. É a interação dos perigos do lugar (risco e mitigação) com o perfil social das comunidades” (CUTTER, 1996).

Os estudos de vulnerabilidade se concretizaram a partir da década de 1980, influenciados pelas pesquisas sobre perigos naturais (*natural hazards*) predominantes até a década anterior. Ao analisar dezoito concepções sobre o tema, entre 1980 e 1995, Cutter (*op. cit.*) mostra ao mesmo tempo a evolução e a falta de unidade do conceito. Porém Adger (2006), diz que a diversidade epistemológica e de métodos sobre a vulnerabilidade não indica a fraqueza do tema e sim a configuração de uma base sobre o qual está apoiado. Ainda, a autora menciona três direções abordadas: a vulnerabilidade como condição pré-existente, onde o foco está na fonte do risco e na exposição a este; como resposta social, diz respeito à resiliência aos riscos; e ao risco local, que conecta as duas anteriores, relacionando o risco biofísico presente em determinados locais e a resiliência a estes.

No campo dos perigos naturais e da análise de riscos (*risk analysis*) a vulnerabilidade emerge como um campo científico, “a ciência da vulnerabilidade”, à medida que se relaciona com as ciências ambientais na abordagem interdisciplinar para suplantando as demandas sociais e políticas na pesquisa científica, indicando as circunstâncias ou lugares onde as pessoas têm menos condições de responder as adversidades ambientais (CUTTER, 2003). Assim, a vulnerabilidade se correlaciona com outros conceitos, como o já mencionado perigo (*hazard*) e os de risco (*risk*) e resiliência (*resilience*). Neste último, a resiliência agregou a capacidade dos grupos em resistir aos perigos e riscos, assim como o de antecipar e responder a essas situações (ADGER, *op. cit.*).

Também, é relevante mencionar a estrutura desenvolvida por Turner *et al.* (2003), para o estudo da vulnerabilidade no âmbito da ciência da sustentabilidade. Neste, constata-se a forte interação entre diversos componentes de influência da vulnerabilidade, exposição e resiliência, assim como a sua distribuição espaço-temporal, onde, a dinâmica global e regional têm grande importância para a análise local e vice-versa. Esse entendimento é crucial para as discussões levantadas nesta pesquisa, onde a vulnerabilidade é abordada ao nível das bacias hidrográficas, mas, sem desconsiderar a magnitude dos processos de alteração da paisagem intermunicipal e aqueles situados na dimensão regional do nordeste paraense e da região amazônica.

Grande atenção vem ganhando a vulnerabilidade às mudanças climática. O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*) define a vulnerabilidade como função da exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa do sistema a mudanças climáticas. O relatório “*Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*” traz a definição:

A vulnerabilidade é o grau em que um sistema é suscetível e incapaz de lidar com os efeitos adversos das mudanças climáticas, incluindo variabilidade climática e extremos. A vulnerabilidade é uma função do caráter, da magnitude e da taxa de mudança climática e variação a que um sistema está exposto, sua sensibilidade e sua capacidade de adaptação (PARRY *et al.*, 2007, p. 894).

Além das mudanças climáticas outra área que emerge dentro da ciência da vulnerabilidade são os recursos hídricos. No século XXI, a problemática dos recursos hídricos necessita da abordagem interdisciplinar das ciências ambientais, pois, questões relacionadas a perda de solo, alteração da qualidade da água, ao abastecimento doméstico e industrial, eutrofização, tratamento de efluentes, proteção dos mananciais e os efeitos sobre a saúde humana são cruciais num cenário de crise hídrica, onde as soluções requerem estratégias complexas (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2011).

Plummer *et al.* (2012), define a vulnerabilidade dos recursos hídricos como “a susceptibilidade de um sistema (indivíduo, comunidade, local) a danos em função de exposição a forças externas (choques, estresse, distúrbios), sensibilidade do sistema e capacidade do sistema para responder (lidar, recuperar, adaptar)”. No estudo da vulnerabilidade dos recursos hídricos, ou vulnerabilidade hídrica, é salutar considerar os aspectos biofísicos e socioeconômicos do meio, da mesma forma como realizar uma abordagem holística na conjuntura da região de interesse, procedimentos necessários para o levantamento de informações sobre essa problemática, as quais geralmente compõem índices genéricos de avaliação (LUERS, 2005). Ainda, um aspecto crucial desse campo de pesquisa, como abordado por Grosbois e Plummer (2015), está relacionado ao nível de análise dos índices comumente aplicados, onde, observa-se certa limitação quanto a escala local de investigação, sendo este um dos enfoques principais desta pesquisa.

Os impactos sobre esses recursos, causadores de sua vulnerabilidade, são de diversas naturezas, como o processo de urbanização, o crescimento demográfico e a pouca integração no gerenciamento. As pesquisas desenvolvidas na região que associam vulnerabilidade e recursos hídricos, geralmente, tratam das águas superficiais ou subterrâneas, em poucos casos de

ambas, estabelecendo indicadores, como os de qualidade da água, e os associando com variáveis ambientais como clima, geologia e pedologia ou socioeconômicas (ANDRADE, 2014; FRANCO *et al.*, 2018; LISBÔA *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2017).

O presente trabalho buscou contribuir nesse arcabouço, onde, há um elemento que associado a análise dos recursos hídricos fornecendo informações sobre diversos níveis de sua vulnerabilidade, que são as mudanças de uso e cobertura da terra (*Land Use and Cover Change* – LUCC, na sigla em inglês). Estas alterações na paisagem são responsáveis por impactos tanto na qualidade quanto na quantidade de água e suas consequências afetam, por exemplo, a produção de alimentos, o clima regional e a preservação de habitats (FOLEY *et al.*, 2005).

Nesse âmbito, especial interesse recai sobre as bacias hidrográficas, unidades de planejamento estabelecidas pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), Lei nº 9.433/1997. As bacias hidrográficas apresentam áreas bem definidas, delimitadas por divisores topográficos. São o elemento terrestre do ciclo hidrológico onde a captação da água precipitada sobre as vertentes converge para a rede de drenagem e a um ponto de saída, chamado exutório. Essas áreas funcionam como sistemas, com a única entrada sendo a precipitação e as demais rotas (escoamento, infiltração e evaporação) as saídas. Então, as modificações naturais ou antrópicas em sua superfície têm efeitos sobre um conjunto complexo de mecanismos autorregulados. (TUCCI, 2001).

O desenvolvimento metropolitano favoreceu as mudanças de uso e cobertura da terra nas bacias hidrográficas, com o emprego de geotecnologias esses padrões podem ser estudados.

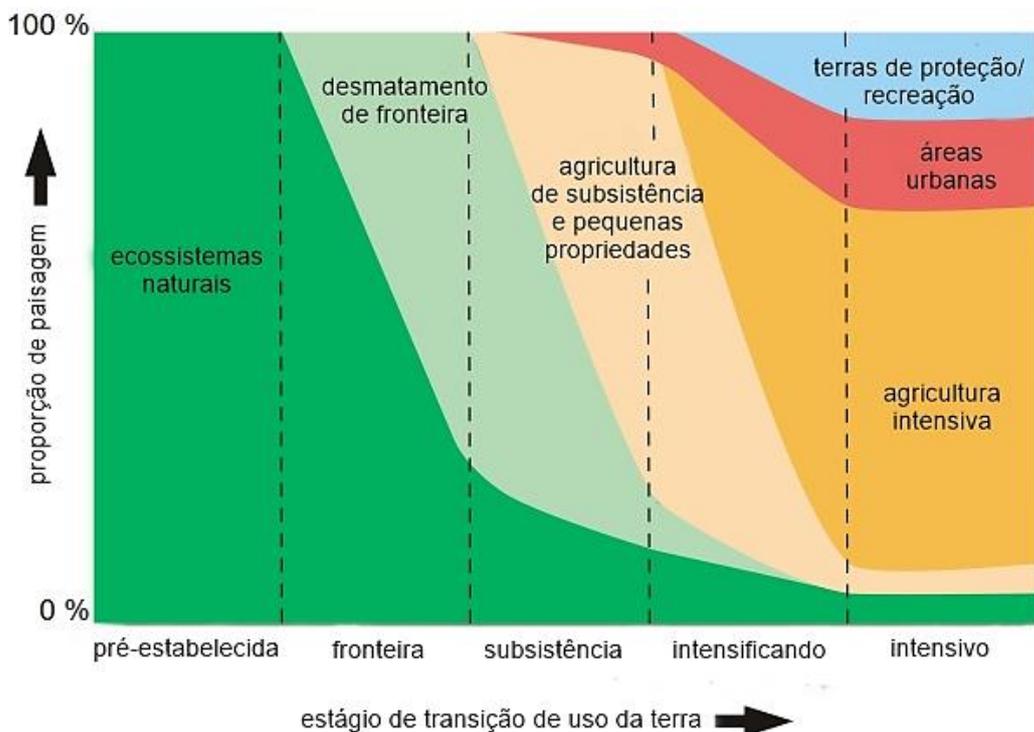
### 3.3 Mudanças de Uso e Cobertura da Terra

Devido sua semelhança, convém distinguir melhor as terminologias cobertura e uso da terra, quando na verdade é uma distinção importante para o monitoramento dos impactos antrópicos sobre a superfície terrestre. Essa discussão passa pelo entendimento dos processos que ocorrem na paisagem e pela ação das atividades humanas (antrópicas) sobre essa. Porém, a *terra* constitui não somente a superfície como também a interação biofísica entre a atmosfera, o solo, a características do terreno, a hidrologia superficial e subterrânea. Assim, a *cobertura da terra* é a condição física da superfície e sua adjacência, incluindo a disposição natural das florestas, da hidrografia e das montanhas, como da sua posterior alteração devido a ação humana com, por exemplo, a adição de áreas construídas, além de outros aspectos do ambiente, como a biodiversidade e as tipologias de solos. Já o *uso da terra* se refere a utilização que a

sociedade exerce sobre tais características, como áreas de lazer, proteção ambiental, abertura de áreas agrícolas e urbanas (BRIASSOULIS, 2000; GUTMAN *et al.*, 2004; IBGE, 2013).

As mudanças de uso e cobertura da terra em nível global foram drásticas durante o século XX, principalmente nos últimos cinquenta anos desse período. Os mais diversos lugares do planeta experimentaram, e continuam experimentando, formas diferentes desse processo; entre as principais atividades que contribuem para essa transição inclui-se o desmatamento de florestas primárias para a agricultura de subsistência, a intensificação da produção agrícola e a expansão das áreas urbanas; mas, as mudanças servem a uma mesma finalidade, que é a de apropriação e uso dos recursos naturais (FOLEY *et al.*, 2005). A Figura 2 mostra esses estágios e a proporção de mudança na paisagem.

Figura 2 - Estágios de transição de uso da terra.



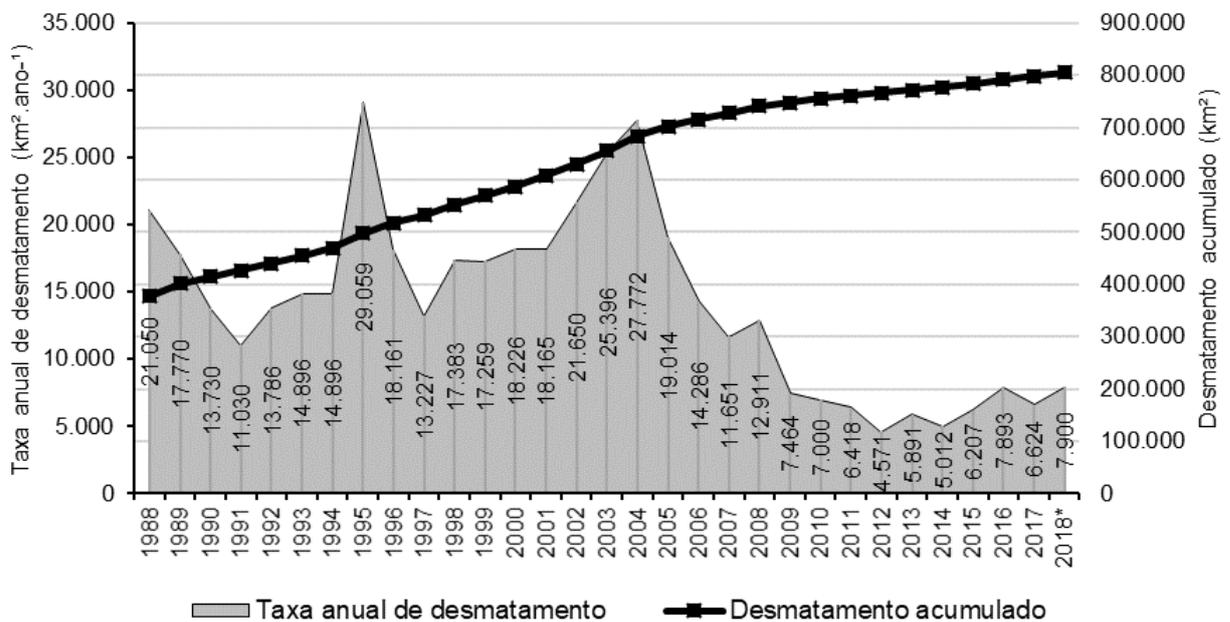
Fonte: Adaptado de Foley *et al.* (2005).

No contexto da Amazônia Legal, vários programas são responsáveis pelo monitoramento das alterações da vegetação nativa e quantificação de tipologias de uso da terra, através de projetos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), como o Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite (PRODES) que monitora o corte raso e apresenta as taxas anuais de desmatamento desde 1988, e o TerraClass que mapeia classes de uso e cobertura apresentado mapas dessa dinâmica, atualmente, disponível no período de 2004 a 2014. Os dados do PRODES, por exemplo, mostram uma tendência linear de queda das taxas anuais de

desmatamento, sendo o ano de 2004 um marco temporal dessa redução com a implantação do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm). A Figura 3 mostra os dados históricos do PRODES.

Apesar da significativa redução das taxas anuais de desmatamento a partir de 2004, a perda total de floresta por corte raso acumulada é crescente, já que, o quantitativo de áreas perdidas é maior que a de recuperadas. Alves (2007), estimou o desmatamento acumulado total em aproximadamente 663 mil km<sup>2</sup> até 2004, agregando os dados mais recentes do PRODES a perda total chegada a 797.717 km<sup>2</sup> até 2017 e 805.617 km<sup>2</sup> em 2018. O ano de 1995 apresentou o maior índice dessa série, chegando a 29.059 km<sup>2</sup>.ano<sup>-1</sup>, seguido de outro em 2014, onde alcançou 27.772 km<sup>2</sup>.ano<sup>-1</sup>.

Figura 3 - Taxas anuais de desmatamento na Amazônia Legal (1988-2018)



Fonte: Elaborado com base em Alves (2007) e INPE (2013). \*Estimado.

Godard *et al.* (2014), constata que o PPCDAm foi eficaz para promover a redução do desmatamento, chegando a diminuir em 77% na primeira (2004 a 2008) e segunda (2009 a 2011) fases, porém, o que se observa a partir da segunda e terceira (2012-2015) fases é certa estagnação, com as taxas anuais variando entre 5.000 e 7.000 km<sup>2</sup>.ano<sup>-1</sup>. Os autores propõem uma mudança de direção nas políticas públicas de contenção do desmatamento, para que a meta de redução de 3.800 km<sup>2</sup> para 2020 seja atingida, baseada na contribuição dos distintos atores responsáveis, tendo como critério o tamanho das propriedades rurais.

Outra alteração de uso e cobertura da terra, tão importante quanto o desmatamento, porém, muito menos debatida e monitorada é a degradação florestal. Na degradação não há o corte raso e sim a remoção de certas espécies vegetais seja pela exploração madeireira ou por queimadas, podendo ocasionar diferentes graus de degradação, com perda de biomassa, biodiversidade e serviços ecossistêmicos (FERREIRA *et al.*, 2015). O Mapeamento da Degradação Florestal na Amazônia Brasileira (DEGRAD) do INPE quantificou a degradação entre os anos de 2007 a 2013, os dados desse período indicam que 102.923 km<sup>2</sup> de floresta degrada, em comparação, o desmatamento nesse mesmo tempo foi de 55.906 km<sup>2</sup> (INPE, 2013; INPE; EMBRAPA 2016). Parte dessas áreas podem passar pelos estágios de sucessão ecológica de florestas secundárias, desde que as perturbações cessem, ou serem completamente desmatadas; no período de avaliação do DEGRAD 3.838 km<sup>2</sup> foram convertidos em corte raso na Amazônia Legal (INPE, *op cit.*).

Outro projeto do INPE, em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), é o Uso e Cobertura da Terra na Amazônia Legal (TerraClass), projeto que mensura diretamente a dinâmica de uso e cobertura da terra através de doze classes temáticas: Agricultura Anual, Mosaico de Ocupações, Pasto Limpo, Pasto Sujo, Regeneração com pasto, Pasto com Solo Exposto, Vegetação Secundária, Reflorestamento, Urbano, Outros, Mineração e Área Não Observada. Sua vantagem em relação aos demais é mostrar onde as mudanças estão ocorrendo. Até o momento cinco anos foram mapeados entre 2004 e 2014, os resultados mostram que 148.536 km<sup>2</sup> da classe floresta foram perdidas, sendo 64.616 km<sup>2</sup> para pastagens, 25.367 km<sup>2</sup> em vegetação secundária, 7.665 km<sup>2</sup> para agricultura e o restante em outras classes (ADAMI *et al.*, 2015; ALMEIDA *et al.*, 2016; INPE; EMBRAPA, 2016; PEREIRA *et al.*, 2016).

Nestes exemplos ficou evidente a importância dos dados de sensoriamento remoto para monitoramento do território em períodos, escalas e com aplicações distintas. O Brasil através do Programa CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite*, Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres) faz parte das nações que fornecem esses produtos ópticos. Os sensores disponíveis continuamente incluem a série Landsat, Spot e Modis, e de micro-ondas ERS, Jers, Radarsat-1, Envisat Asar fornecem informações para o monitoramento rápido e de baixo custo da Amazônia (SOUZA FILHO *et al.*, 2006). Os autores citam ainda outras contribuições como a conservação dos recursos naturais, exploração mineral, reconhecimento e vigilância das zonas úmidas e da zona econômica exclusiva e para os recursos hídricos.

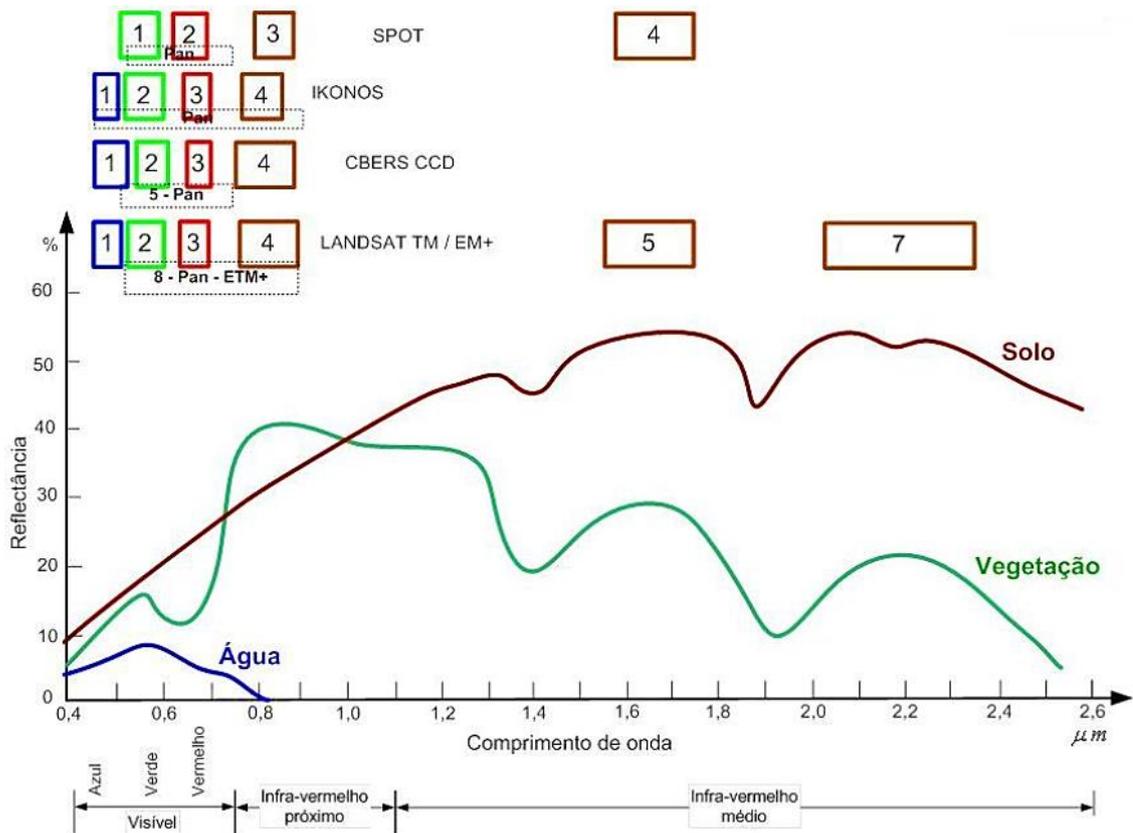
### 3.4 Sensoriamento Remoto do Meio Ambiente

Retomando o raciocínio da última parte da seção anterior, discute-se agora conceitos fundamentais de *sensoriamento remoto*, campo de aplicação metodológica do presente trabalho. O termo sensoriamento vem do instrumento de medição a bordo dos satélites artificiais em órbita da terra, os sensores, enquanto remoto remete a aquisição de informações a distância, nesse caso, a informação captada pelos sensores é a energia eletromagnética emitida ou refletiva pela superfície terrestre (FLORENZANO, 2007).

Neste campo, é importante conhecer o comportamento espectral dos objetos terrestres estudados (vegetação, solo, água e etc.), bem como, as características dos sensores quanto as mesmas faixas espectrais. A distribuição dessas faixas de radiação eletromagnética segundo os comprimentos de onda ( $\gamma$ ) e frequência ( $f$ ) é comumente representada na forma do espectro eletromagnético, que varia de ondas curta e de alta frequência, como os raios cósmicos, até ondas longas e de baixa frequência, como as ondas de rádio (FLORENZANO, *op. cit.*).

A superfície pode absorver, transmitir ou refletir a energia recebida, a parte refletida, chamada de reflectância, é a fração captada pelos sensores, onde, cada tipo de superfície dispõe de uma assinatura espectral (FITZ, 2008). Por exemplo, a informação oriunda da vegetação tem uma forma identificável dentro do espectro e até mesmo diferentes tipos de estágios de sucessão florestal de distintas formas, assim como outros tipos de superfícies também têm. Da mesma forma, os sensores remotos são projetados para operar em bandas, que correspondem a faixas dentro de espectro eletromagnético, para cada tipo de estudo uma ou mais bandas correspondentes podem ser usadas (JENSEN, 2009). A Figura 4 mostra a assinatura espectral da vegetação, da água e do solo, além das faixas de captação dos sensores dos satélites SPOT, IKONOS, CBERS e Landsat.

Figura 4 - Exemplo de comportamento espectral de alvos e bandas de sensores remoto.



Fonte: Adaptado de Maia *et al.* (2017).

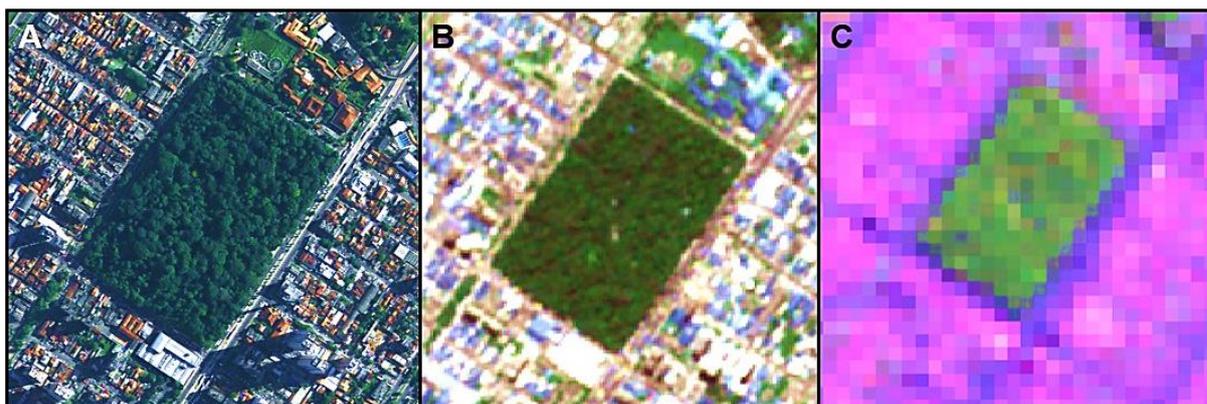
A maioria dos instrumentos sensores têm a competência de detectar a energia no espectro do visível (0,38 μm a 0,7 μm) e do infravermelho (0,7 μm a 10<sup>3</sup> μm), o que os torna eficazes para estudar diversos tipos de objetos, além dos citados anteriormente, como aqueles presentes nas áreas urbanas. Porém, há outros fatores que interferem na seleção de imagens de satélite para estudos no campo das Ciências Ambientais, com maior relevância para o presente estudo cita-se as resoluções espectral, espacial, radiométrica e temporal.

Resumidamente, a espectral corresponde a número de bandas espectrais, por exemplo, o sensor TM/Landsat-5 tem sete bandas. A espacial está relacionada ao tamanho de cada *pixel* que constitui a imagem, que é a área de fato englobada no terreno, o mesmo sensor do exemplo anterior tem 30 m de resolução espacial na maioria de suas bandas, com exceção da termal que é de 120 m. A radiométrica são os níveis de cinza possíveis, representada em *bits* na forma 2<sup>n</sup> onde *n* é o número de *bits*, uma imagem de 8 *bits* tem 2<sup>8</sup> ou 256 níveis de cinza ou níveis digitais. E a temporal é o período de revisita do satélite em um mesmo ponto, o sensor TM tem resolução temporal de 16 dias (FITZ, 2008).

Na execução deste trabalho essas características das imagens são de extraordinária relevância, pois, trata-se de um estudo em multiescala e multitemporal, ou seja, distinta grandezas

de escala e tempo. Isto é necessário pois a partir de área de estudo principal, a mesorregião de Belém, são descritas unidades de estudo intermediárias, as mesobacias, e ainda menores que estas, as microbacias, portanto, sendo necessário níveis de detalhamentos distintos para ambos os casos. Como se sabe, quanto maior a escala cartográfica, maior também será o nível de detalhes que podem ser observados na imagem (FITZ, 2008). A Figura 5 mostra a diferença de resolução espacial entre os tipos de sensores usados na pesquisa.

Figura 5 - Diferença de resolução espacial entre imagens de sensores.



Bosque Rodrigues Alves em Belém, a partir de A. Ortofotos, B. RapidEye e C. Landsat-5.

As ortofotos têm nível de detalhamento maior de uma pequena área, os *pixels* de 40x40 cm permitem o imageamento de áreas de 0,16 m<sup>2</sup> por *pixel*, o suficiente para se identificar um automóvel ou uma árvore na paisagem. Essa razão decresce para o satélite RapidEye e ainda mais para o Landsat, que têm resolução espacial de 5 m e 30 m, respectivamente.

Conhecido os aspectos técnicos e físicos dos produtos dos sensores remoto, parte-se para a sua interpretação, que nada mais é do que o reconhecimento das diferentes feições presentes na imagem, cita-se florestas, rios, cidades e muitas outras. Essa interpretação vai depender de suas características anteriormente discutidas, tendo como elemento fundamental o *pixel*. Tonalidades, formas e texturas são passíveis de reconhecimento, seja através da identificação visual ou com o emprego de algoritmos sofisticados de geoprocessamento (JENSEN, 2009).

Neste sentido, este estudo empregou uma abordagem híbrida, onde, tanto é necessário o auxílio de um software específico, quanto a experiência do analista no reconhecimento dos elementos da paisagem da área de estudo.

#### 4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

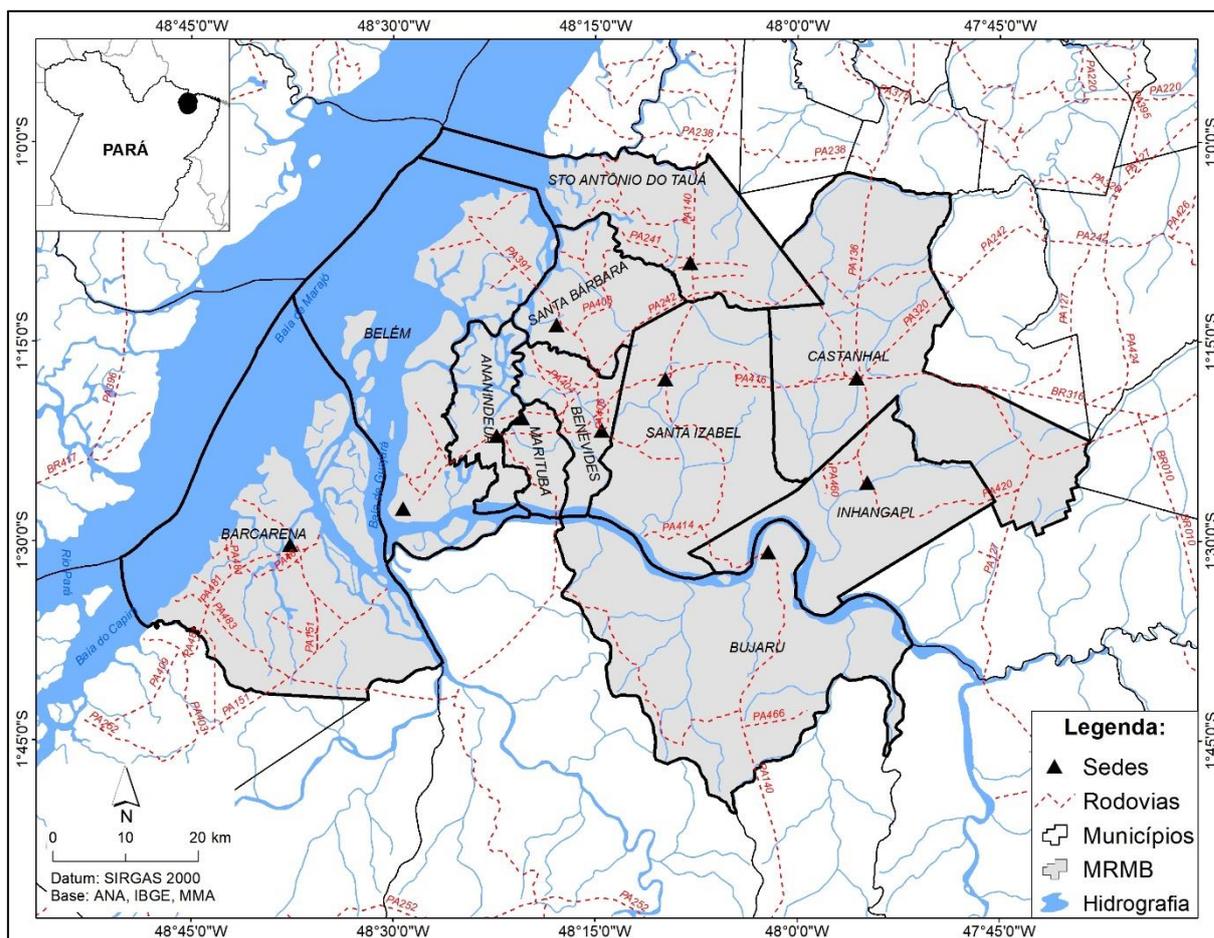
Em 1990 o IBGE publicou a *Divisão Regional do Brasil em Mesorregiões e Microrregiões Geográficas*, classificação territorial e política do espaço geográfico brasileiro que a partir de critérios socioeconômicos, naturais e de infraestrutura, dividiu os estados em unidades com a mesma identidade regional, ou seja, com aspectos comuns das características supracitadas, essas foram denominadas de *mesorregiões*. Estas, por sua vez, foram subdivididas em áreas com certas especificidades de organização, chamadas de *microrregiões*, tendo como fatores marcantes a estrutura de produção e a interação espacial, na época em que o Brasil contava com 4.490 municípios, que deram origem a 137 mesorregiões e 558 microrregiões (IBGE, 1990).

A delimitação da área de estudo é um ponto crucial para o desenvolvimento de uma pesquisa, devendo ser estabelecida de forma a concatenar a abordagem estabelecida pelos pesquisadores com a exequibilidade necessária. Assim, a divisão em mesorregiões foi utilizada visando proporcionar um nível mais amplo da análise.

Nesse contexto, o estado do Pará possuía 6 mesorregiões e 22 microrregiões, entre elas, destaca-se a MRMB, constituída por duas microrregiões: (i) a microrregião de Belém, formada pelas cidades de Ananindeua, Barcarena, Belém e Benevides; e (ii) a microrregião de Castanhal, com Bujaru, Castanhal, Inhangapi, Santa Izabel do Pará e Santo Antônio do Tauá (IBGE, *op. cit.*). Posteriormente, com o surgimento de Marituba e Santa Bárbara, a mesorregião passou a ter a configuração atual com doze municípios. Uma nova proposta de regionalização das regiões geográficas brasileiras foi proposta pelo IBGE em 2017, substituindo e ampliando a designação de mesorregião para Regiões Geográficas Intermediárias (IBGE, 2017b).

A Figura 6 mostra a distribuição espacial dos onze municípios que constituem a MRMB. Eles se estendem por, aproximadamente, 6.890,61 km<sup>2</sup> entre as latitudes de 01°00' a 01°50' Sul e longitudes de 47°40' a 48°50' Oeste. Os principais eixos de circulação de pessoas e mercadorias da região incluem a rodovia Capitão Pedro Teixeira (BR-316) e a Bernardo Sayão (BR-010), a Belém-Brasília, além das estaduais PA-140, passando por Santa Izabel e Bujaru, e da PA-483, Alça Viária do Pará, ligando Barcarena as demais cidades. E, os recursos hídricos da região incluem as Baías do Marajó e do Guajará, os rios Guamá, Acará, Capim e Moju, além daqueles que nomeiam as bacias citadas.

Figura 6 - Localização dos municípios que compõem a MRMB.



Entre os censos demográficos de 1970 e 2010 a população da MRMB mais que triplicou, passando de 774.288 habitantes para 2.438.297 habitantes, respectivamente. Nesse mesmo período, a população urbana correspondia a 26,41% e a rural a 73,59%, de modo recíproco, passando a 55,75% e 44,25% no fim do intervalo. Por exemplo, no município de Castanhal a população urbana representava 67,71% dos seus 37.910 habitantes em 1970, alterando-se para 88,58% dos 173.149 habitantes em 2010. A densidade populacional média da MRMB era de 509,15 hab./km<sup>2</sup> no último censo, com Ananindeua apresentando o valor máximo de 2.477,55 hab./km<sup>2</sup> e Inhangapi o valor mínimo de 21,29 hab./km<sup>2</sup>. O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) médio era de 0,653 em 2010, sendo Belém o maior valor (0,746) e Bujaru o menor (0,552).

A concepção inicial do referido projeto objetiva a seleção de quatro microbacias e mesobacias, das quais duas serão selecionadas para cada caso; a escolha será baseada na abrangência da área e na qualidade das imagens disponíveis, principalmente, quanto a presença de nuvens, além da execução de processos de correção atmosférica. A base vetorial que delimita



Tabela 2 - Área total e porcentagem ocupada pelas bacias por município.

Bacias	A (km <sup>2</sup> )	2P (km)	Área das bacias por município (%)
<b>Microbacias hidrográficas</b>			
Ariri	37,10	28,30	Ananindeua (62,58) e Belém (37,42)
Aurá	21,41	21,75	Belém (59,80) e Ananindeua (40,20)
Maguari-Açu	29,31	25,78	Ananindeua (100)
Murutucum	34,67	27,13	Belém (87,16) e Ananindeua (12,84)
Média	31,78	26,17	-
<b>Mesobacias hidrográficas</b>			
Apeú	316,47	88,88	Castanhal (76,51), St. Izabel (14,03) e Inhangapi (9,46)
Caraparu	407,87	97,02	St. Izabel (98,27), Benevides (1,57) e Castanhal (0,17)
Guajará-Açu	352,53	101,67	Bujaru (98,21) e Acará (1,79)
Tauá	415,66	105,29	Tauá (44,67), St. Bárbara (23,80), St. Izabel (30,27) e Castanhal (1,26)
Média	373,13	98,21	-

A: área e 2P: perímetro.

Os critérios de seleção dessas bacias foram baseados, primeiro, no objetivo principal do projeto, que era estudar os recursos hídricos e a vulnerabilidade a partir de uma abordagem multi-escalar, ou seja, analisar esse fenômeno sobre diferentes escalas cartográficas. Em segundo lugar, pela disponibilidade de dados, pois, há a necessidade de ser estabelecida a compatibilização entre as dimensões das bacias e os produtos de sensoriamento remoto, onde, bacias menores necessitariam de resoluções espaciais mais refinadas, em relação as de área um pouco maiores.

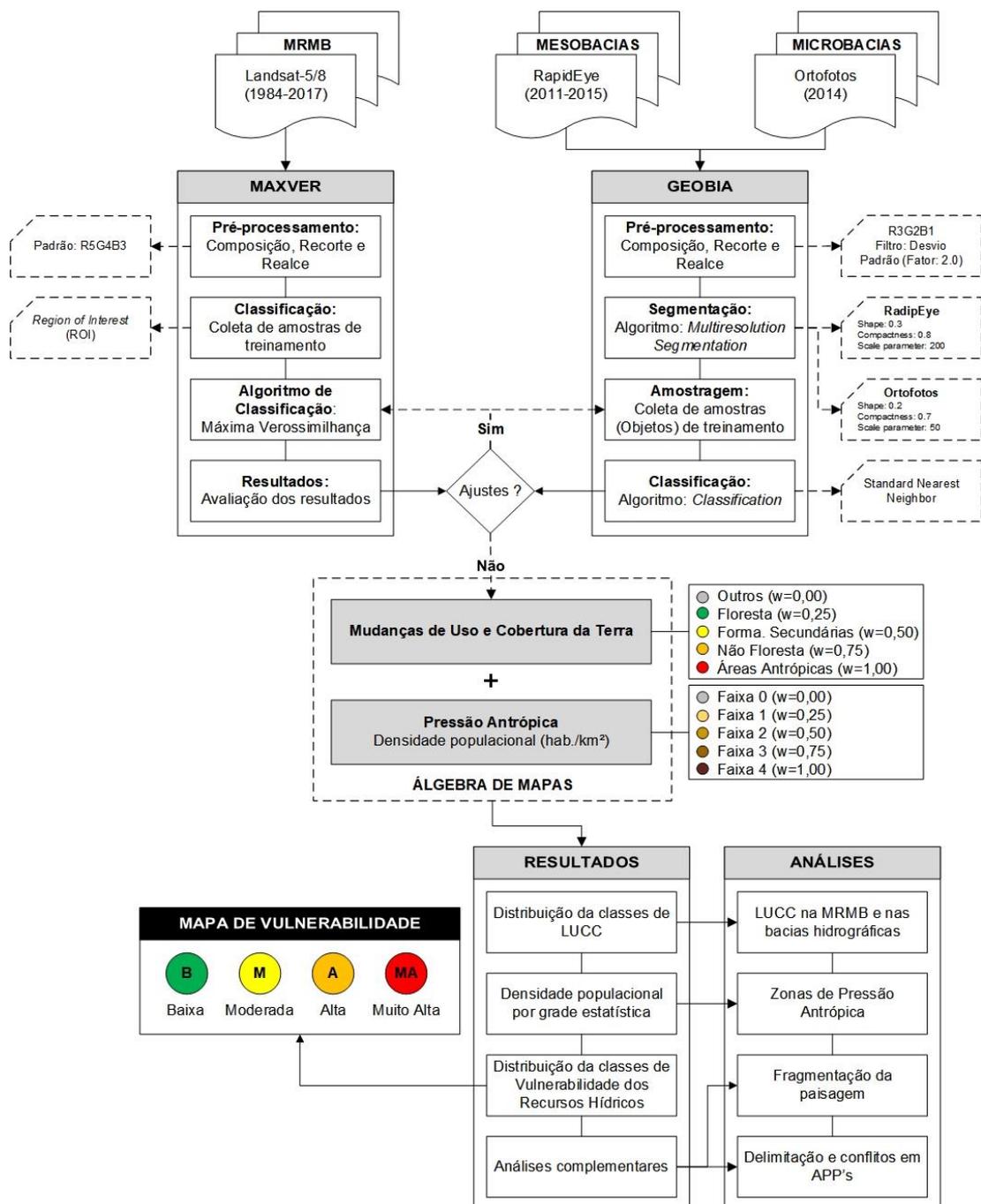
Então, dois contextos são relevantes para a compreensão da dinâmica dessa região, um de natureza histórico-geográfico e outro de natureza hidroambiental. O primeiro se refere a inserção da área de estudo no nordeste paraense, uma das mais antigas fronteiras de ocupação do estado do Pará e da Amazônia; e o último sobre sua localização na região de influência da bacia hidrográfica do rio Guamá, condição que satisfaz a sua importância do ponto de vista estratégico para a economia regional e, portanto, para gestão integrada dos recursos hídricos (CORDEIRO *et al.*, 2017).

A climatologia da região, segundo a classificação de Köppen, é de clima quente e úmido do tipo Af<sub>i</sub>, definido por altos índices de pluviosidade durante todo o ano, com o período de menor pluviosidade superior a 60 mm. Há dois períodos bem definidos, o mais chuvoso, entre dezembro e maio, sendo março o mês de maior precipitação acumulada, e menos chuvoso, entre junho e novembro, com outubro sendo o mês menos chuvoso; sendo as médias anuais de temperatura em 26°C, umidade relativa do ar de 85% e precipitação de 2.870 mm (PACHÊCO *et al.*, 2009; SANTOS *et al.*, 2017).

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta se baseia na aplicação de técnicas de geoprocessamento sobre produtos de distintos sensores remotos, que em associação com dados secundários forneceram a análise necessária do problema proposto, a partir de um cenário multitemporal e em diferentes escalas cartográficas. A Figura 8 mostra de forma genérica as etapas do processo metodológico. O desenvolvimento de cada etapa é descrito nas seções subsequentes.

Figura 8 - Fluxograma da metodologia.



## 5.1 Base de Dados Geoespacial

A base de dados geoespacial inclui arquivos matriciais de produtos de sensores remotos em formato *geotiff*, como do TM/Landsat-5, OLI/Landsat-8, *RapidEye* e Ortofotos. E, arquivos vetoriais no formato *shapefile*, como os da malha municipal fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e de hidrografia da Agência Nacional de Águas (ANA). A Tabela 3 contém a descrição completa da base utilizada.

Tabela 3 - Fundamentos da base de dados geoespacial.

<b>Materiais/Fontes</b>	<b>Características</b>	<b>Análises</b>
TM/Landsat-5 (Catálogo do INPE)	Período: 1984, 1994 e 2008 Resolução espacial: 30 m Escala de estudo: 1:100.000	Mudanças de uso e cobertura da terra na mesor-região.
OLI/Landsat-8 (Earth Explorer USGS)	Período: 2017 Resolução espacial: 30 m Escala de estudo: 1:100.000	Mudanças de uso e cobertura da terra na mesor-região.
<i>RapidEye</i> (Geocatálogo MMA)	Período: 2011 a 2015 Resolução espacial: 5 m Escala de estudo: 1:25.000	Mudanças de uso e cobertura da terra nas mesobacias. Área ripária e conflitos em APP.
Ortofotos (CENSIPAM)	Período: 2014 Resolução espacial: 0,5 m Escala de estudo: 1:4.000	Mudanças de uso e cobertura da terra nas microbacias. Área ripária e conflitos em APP.
TerraClass INPE; EMBRAPA (2016)	Período: 2004 a 2014 Escala de estudo: 1:100.000	Uso e cobertura da terra na MRMB na década compreendida entre 2004 e 2014.
SRTM (Earth Explorer USGS)	Resolução espacial: 30 m	Delimitação de bacias e rede de drenagem.
Malhas digitais IBGE (2016)	Mesorregião, municípios, setores censitários, grade estatística, aglomerados subnormais.	Extensão territorial das unidades de estudo.
Hidrografia (Metadados ANA, SEMAS-PA)	Rios principais e afluentes.	Densidade de drenagem, floresta ripária e APP.
Mesobacias Venticinque <i>et al.</i> (2016) (Metadados ANA)	Limites das mesobacias	Extensão territorial das mesobacias, distribuição por municípios e outros.
Microbacias Pereira (2007)	Limites das microbacias.	Extensão territorial das microbacias, distribuição por municípios e outros.
ArcGIS® 10.3	<i>Softwares</i>	Análise espacial de dados ambientais.
QGIS® 2.18		Análise espacial de dados socioeconômicos.
ENVI® 4.7		MaxVer e PDI.
eCognition® 9		GeoBIA.
Google Earth® Pro		Reconhecimento de feições.
Fragstat® 4.2		Métricas de paisagem.
AutoCAD® 2016		Dados em formato DXF e DWG.

## 5.2 Abordagem Híbrida: Sensores Remotos

A metodologia dos estudos em sensoriamento remoto tem utilizado a análise híbrida com ênfase nessas duas aplicações: produtos ou técnicas distintas. No primeiro caso, utiliza-se imagens oriundas de dois ou mais sensores para analisar um mesmo fenômeno de diferentes pontos de vista, por exemplo, Dal'Asta *et al.* (2015), utilizaram produtos do TM/Landsat-5 e SPOT-5 para estudar a expansão urbana da cidade de Santarém, no Pará.

No outro caso, emprega-se técnicas de análise diferentes para efeito de comparação de resultados; Mello *et al.* (2012) testou classificadores digitais supervisionados e não-supervisionados em imagens TM/Landsat-5 para determinar padrões de cobertura da terra no estado de Rondônia. Outras abordagens incluem a fusão entre imagens ópticas de diferentes sensores ou entre estas e imagens de radar. Cabe destacar a metodologia do projeto DETER-B (Sistema de Detecção do Desmatamento em Tempo quase Real) que utiliza imagens dos satélites CBERS-4, sensor WFI com resolução espacial de 64 m, e do IRS (*Indian Remote Sensing Satellite*), sensor AWiFS com resolução espacial de 56 m, o qual leva em consideração os parâmetros de textura, cor, tonalidade, forma e contexto, além do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) (DINIZ *et al.*, 2015).

Esta metodologia transita entre os dois casos exemplificados, utilizando produtos de sensores distintos com a aplicação de diferentes técnicas. A primeira parte está focada em estabelecer a dinâmica e fragmentação da paisagem na MRMB através da caracterização de agentes de mudanças de uso e cobertura da terra, assim como, outras variáveis que auxiliem no entendimento da construção do espaço geográfico metropolitano e dos impactos antrópicos presentes. Para essa finalidade optou-se pelo uso de imagens dos sensores TM/Landsat-5 (*Thematic Mapper*), para os anos de 1984, 1994 e 2008, e OLI/Landsat-8 (*Operational Land Imager*) para o ano de 2017, escolhidas devido à ausência de nebulosidade sobre a área de estudo, referentes a órbita/ponto 223/61.

A sistematização dos dados vetoriais georreferenciados, o processamento digital de imagens (PDI) e a análise espacial foram realizadas com auxílio dos *softwares* ENVI, ArcGIS e QGIS. Na fase de pré-processamento foi feita a composição RGB (*Red-Green-Blue*) e o registro das imagens oriundas do catálogo do INPE, pelo método *Image to Image* (Imagem para Imagem) para correção de distorções geométricas (SILVA *et al.*, 2012). As imagens do *United States Geological Survey* (USGS) já são disponibilizadas com ortorretificação. Padrões de composição podem incluir a falsa cor R5G4B3 e R6G5B4, para TM e OLI, respectivamente, na análise da vegetação. Ou ainda, R7G5B3 do TM e R7G6B4 do OLI na análise da expansão

urbana (USGS, 2016). Outros procedimentos como normalização radiométrica, aplicação de contraste e realce ajudaram na identificação das feições selecionadas.

Há uma adequação entre o comprimento de onda das bandas desses sensores e o comportamento espectral dos alvos nas faixas do visível, infravermelho próximo e de ondas curtas. As características das bandas dos sensores citados usadas na composição para analisar a vegetação são descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características de interesse das bandas dos sensores TM e OLI

Sensor TM (bandas)	Sensor OLI (bandas)	Características
Visível vermelho		Utilizada para análise de diferenciação de espécies vegetais, por apresentar a propriedade de absorção de clorofila. Eficaz para o estudo de identificação de área agrícolas e delimitação de áreas urbanas.
3	4	
Infravermelho próximo		Utilizada para a demarcação de redes de drenagem e de corpos d'água, em função da grande absorção de energia pela água nessa faixa do espectro. Também, usada diferenciar certos tipos de vegetação em análises de rugosidade.
4	5	
Infravermelho médio		É utilizada para análises de saúde da vegetação, especialmente sobre a escassez de água, devido sua boa resposta ao teor de umidade da vegetação.
5	6	

Fonte: Elaborado com base em Fitz (2008).

Trata-se agora sobre os produtos do RapidEye e das ortofotos. O projeto RapidEye engloba uma constelação composta por cinco satélites que fornecem imagens multiespectrais, com 12 bits por pixel de resolução radiométrica, 4.096 níveis de cinza, e resolução espacial de 6,5 m reamostrado a 5 m quando ortorretificado (FELIX *et al.*, 2009). Desde a aquisição por parte do Ministério do Meio Ambiente (MMA) de imagens do sensor REIS (*RapidEye Earth Imaging System*), cobrindo todo o território nacional, no período de 2011 a 2015, as aplicações desse se diversificaram, seja na agricultura, na mineração, no planejamento urbano ou para monitoramento de diversas modalidades, inclusive com a adoção desses produtos para a composição do Cadastro Ambiental Rural (CAR).

As ortofotos foram disponibilizadas pelo Centro Gestor e Operacional do Sistema de Vigilância da Amazônia (CENSIPAM), com 0,4 cm de resolução espacial, oriundas de levantamento realizado em julho de 2014, com o sensor ADS-80. O sensor aerotransportado ADS-80 (*Airbone Digital Sensor*) desenvolvido pela empresa suíça Leica Geosystem foi usado nesse levantamento, integrada em um sistema inercial e receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*). A câmera aerofotogramétrica digital produz imagens de forma contínua na direção de voo através da varredura em linha, chamada *pushbroom*, possuindo três formas de visada: anterior, nadir e posterior, fornecendo assim visualização de estereoscopia em 100% da faixa imageada. As especificações incluem ainda resolução radiométrica de 12 bits e quatro bandas espectrais: pancromática, vermelho, verde, azul e infravermelho próximo (MARINHO *et al.*, 2015; TOMMASELLI *et al.*, 2010).

Em razão da cobertura de nuvens e visando manter a exequibilidade da pesquisa foi optado por incluir na análise de vulnerabilidade somente as microbacias dos rios Ariri, Maguari-Açu e Murutucum.

Assim, a abordagem híbrida em relação aos sensores remotos proposta por esta metodologia utilizará imagens Landsat-5, nos anos de 1984, 1994 e 2008, e Landsat-8, no ano de 2017, para caracterizar a MRMB; imagens RapidEye, em mosaico para os anos disponíveis de 2011 a 2015, para estudar as mesobacias; e, ortofotos do ano de 2014, no tratamento das microbacias.

### 5.3 Abordagem Híbrida: Classificação Supervisionada

O estudo dos diversos elementos da paisagem foi potencializado com a aplicação de técnicas de classificação de imagens. A classificação de imagens de satélite diz respeito a representação dos seus elementos formadores, os *pixels*, em classes de uso e cobertura da terra predeterminadas ou não pelo analista; os classificadores, que são algoritmos de classificação, associam ou rotulam cada *pixel* a partir de parâmetros estatísticos de reconhecimento dos padrões espectrais (MOREIRA, 2007). A classificação geralmente segue duas etapas, iniciando com coleta de amostras de treinamento seguida pela aplicação do classificador; quando o analista interfere na primeira fase diz-se que a classificação é supervisionada, já quando está é feita de forma automática pelo *software* através do agrupamento (*cluster*) de informações, chama-se de classificação não-supervisionada (FITZ, 2008).

Este trabalho se baseia em duas metodologias de classificação supervisionada: o método da Máxima Verossimilhança (MaxVer), no termo em inglês, *Maximum Likelihood*, e a Análise de Imagens Baseada em Objetos Geográficos (GeoBIA), em inglês, *Geographic Object-Based Image Analysis*. O primeiro para caracterizar a MRMB com imagens dos sensores TM e OLI do Landsat-5 e 8, respectivamente, auxiliado pelo software ENVI<sup>®</sup> 4.7, e o segundo para estudar as bacias hidrográficas com as imagens do RapidEye e ortofotos, auxiliado pelo software eCognition<sup>®</sup> 9. Essa distinção entre método e tipo de imagem é em razão do que se observa na literatura, algumas feições das imagens de alta, RapidEye, e altíssima, ortofotos, resolução espacial são melhores representadas por classificadores orientados a objetos, apresentando crescimento vertiginoso na última década, tratado como um novo paradigma (BLASCHKE, 2010; BLASCHKE *et al.*, 2014).

A escolha dos métodos supervisionados se justifica pelo bom conhecimento da área de estudo, além de consideráveis fontes que podem subsidiar este trabalho, como pesquisas anteriormente realizadas pelo autor na área (COSTA *et al.*, 2015; COSTA, 2016; COSTA *et al.*, 2016; COSTA e ROCHA, 2016), a disponibilidade de banco de dados de imagens com localização geográfica como a fototeca do INPE e a utilização de programas como o Google Earth<sup>®</sup> Pro e fontes secundárias (ADAMI *et al.*, 2015; ALMEIDA *et al.*, 2016; SOUZA *et al.*, 2011; WATRIN *et al.*, 1996). Portanto, a classificação supervisionada é indicada quando o analista tem um bom conhecimento sobre a área de estudo (FITZ, 2008).

De forma a compor um arcabouço teórico-metodológico bem delimitado que contemplasse tanto o estudo em nível intermunicipal, quanto no nível das bacias hidrográficas, foram determinadas quatro principais classes de uso e cobertura da terra. Sendo, duas classes de cobertura da terra: Floresta e Formações Secundárias; e duas de uso da terra: Não Floresta e Áreas Antrópicas (Figura 9). Outras classes podem incluir a hidrografia, nuvens e sombras; exemplos desses elementos da paisagem podem ser vistos na Figura 10.

Figura 9 - Chave de classificação e descrição das classes de uso e cobertura da terra.

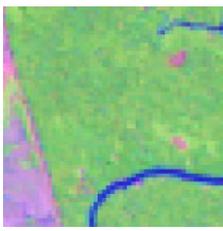
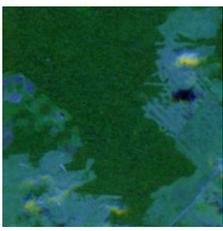
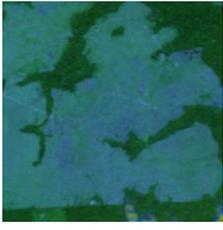
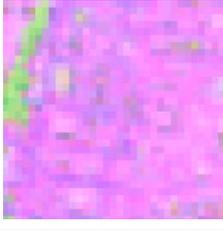
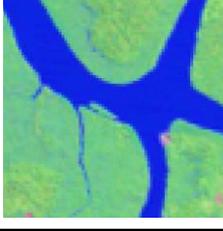
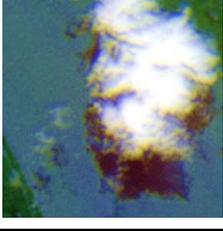
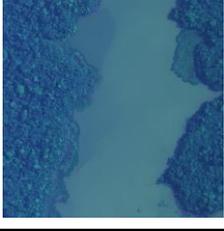
Classes	Landsat	RapidEye	Ortofoto	Descrição
<i>Floresta</i>				Floresta primária ou vegetação arbórea densa.
<i>Formações Secundárias</i>				Capoeira ou vegetação secundária, em distintos estágios de sucessão ecológica. Inclui áreas de reflorestamento.
<i>Não Floresta</i>				Pastagens e áreas agrícolas. Nas ortofotos inclui faixas de gramíneas de praças, jardins e outros logradouros.
<i>Áreas Antrópicas</i>				Áreas urbanas, com solo exposto, exploração mineral.
<i>Outras</i>				Hidrografia, nuvens/sombra e áreas não classificadas.

Figura 10 - Exemplos de elementos da paisagem na MRMB.

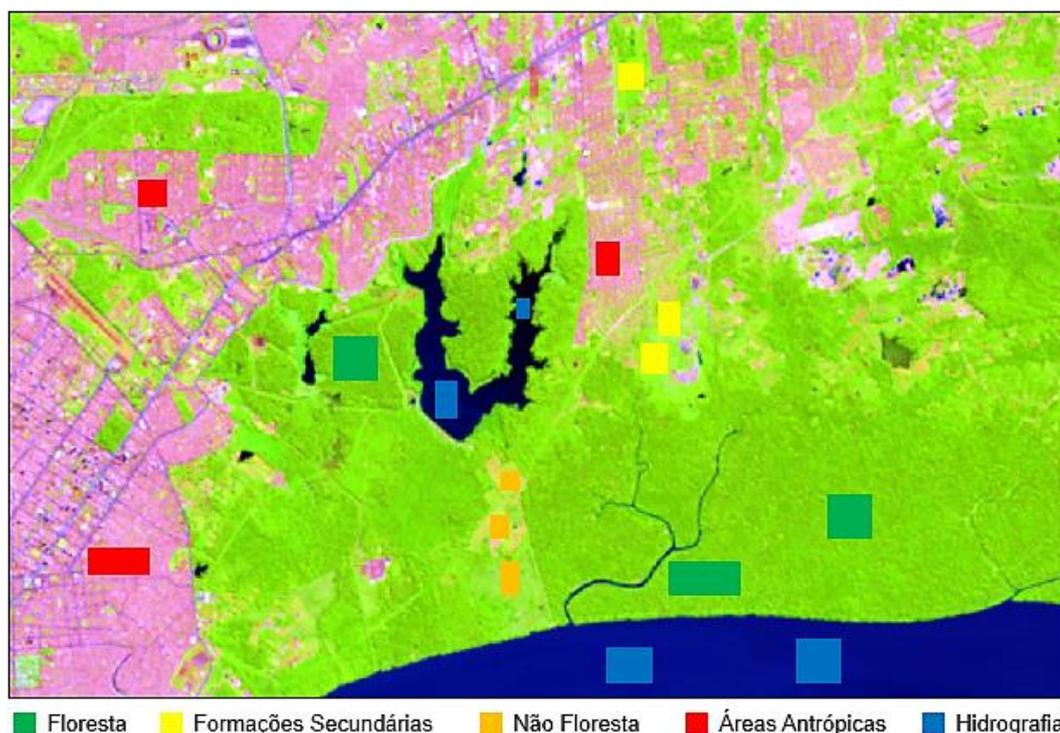


Fonte: Fototeca OBT/INPE – TerraClass 2012 (<http://www.obt.inpe.br/fototeca/>)

A. Remanescente de floresta em St. Antônio do Tauá; B. Formações secundárias na margem de rodovia em St. Antônio do Tauá; C. Área de agricultura em Santa Izabel do Pará; e D. Pastagem em Castanhal.

Em estatística, uma propriedade importante das estimativas de máxima verossimilhança diz que essas estimativas são geralmente coerentes para determinar o parâmetro a ser estimado, quando o tamanho das amostras for suficientemente grande (MEYER, 2012). Então, o método de MaxVer se caracteriza pela seleção de amostras de treinamento, chamadas ROI (*Region of Interest*), representativas das classes de uso e cobertura da terra previamente identificadas na região de estudo, onde estatísticas de média e covariância dos valores de reflectância são usadas para determinar a probabilidade de um *pixel* externo a amostra pertencer a classe indicada (FITZ, 2008). A Figura 11 mostra um exemplo de seleção das regiões de interesse em uma imagem TM/Landsat-5.

Figura 11 - Imagem TM/Landsat-5 mostrando as amostras de treinamento.



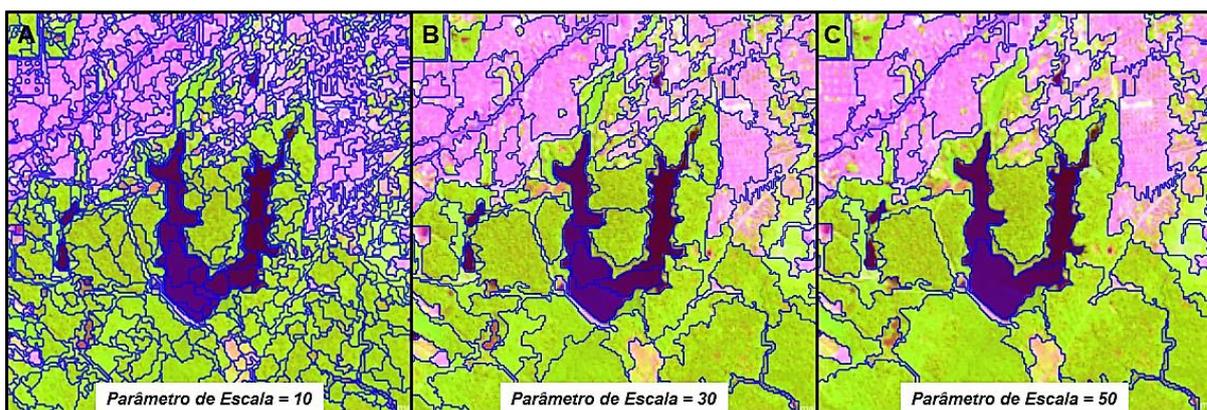
Definidas as amostras aplica-se o algoritmo de MaxVer. Após a classificação o *software* permite gerar a matriz de confusão, onde é possível observar a quantidade de *pixels* que foram classificados erroneamente fora da amostragem e, a partir disso, determinar a exatidão global do processo. Levando em consideração a totalidade da matriz de confusão, também é calculado o índice *Kappa* (K), um coeficiente que variando de 0 a 1 serve para avaliar a precisão da classificação, sendo, os valores compreendidos entre  $0,8 < K \leq 1$  determinados com o conceito de excelente, sendo, melhor a avaliação da classificação (CONGALTON, 1991; ROSENFELD; FITZPATRICK-LINS, 1986).

Diferente dos métodos que realizam classificação supervisionada por *pixel* como na MaxVer, levando em consideração os valores de reflectância, a análise baseada em objetos (OBIA – *object-based image analysis*) é uma classificação por região, trabalhando com outras características das amostras além de sua informação espectral, como informações espaciais na relação entre os *pixels* e sua vizinhança; agora essas regiões são chamadas de objetos. A definição de GeoBIA vem sendo empregada com a finalidade de enfatizar duas questões fundamentais desse método (i) a significativa contribuição do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e (ii) na base dada as aplicações relacionadas ao espaço (BLASCHKE *et al.*, 2008). Como no presente trabalho a distribuição espacial é importante será usada a expressão que determinada tal uso.

A segmentação é a fase preliminar da classificação baseada em objetos. Essa etapa divide a imagem em objetos homogêneos de análise, reduzindo os detalhes e a sua complexidade, tornando o seu conteúdo interpretável, assim, a avaliação pode ser em função do comportamento espectral dos objetos, em termos de sua agregação ou ainda de sua vizinhança (BLASCHKE *et al.*, 2008).

A dificuldade desse processo reside na definição do limiar adequado dos parâmetros de classificação de acordo com as características dos sensores utilizados. O eCognition® é um *software* destinado a realizar esse tipo de classificação, contando como uma série de algoritmos de segmentação, entre eles o *multiresolution segmentation* (segmentação multiresolução). Três são os parâmetros de entrada desse algoritmo: *scale parameter* (parâmetro de escala), define o tamanho dos segmentos, quanto maior o valor adicionando maior o tamanho dos objetos; *shape* (forma), define a homogeneidade da textura dos objetos; e *compactness* (compacidade), é um dos parâmetros para o fator de forma, restringindo a forma dos segmentos para serem compactos e suaves quando forem grandes ou pequenos, respectivamente (BLASCHKE *et al.*, *op cit.*). A Figura 12 mostra diferentes parâmetros de escala para uma imagem Landsat-5.

Figura 12 - Imagens com diferentes parâmetros de escala.



Após uma série de testes e consulta bibliográfica (SILVA *et al.*, 2016), definiu-se os limiares de parâmetro de escala em 200, forma em 0,3 e compacidade em 0,8 para as imagens RapidEye; e os limiares de 50, 0,2 e 0,7, respectivamente, para as ortofotos.

Os procedimentos subsequentes incluem a inserção dos parâmetros de classificação, que envolvem a determinação das classes de uso e cobertura da terra, a escolha do algoritmo de classificação, a escolha das bandas a serem levadas em consideração e a coleta das amostras de treinamento, que são os objetos. Na pós-classificação é possível ainda editar os resultados, unir

polígonos de classes semelhantes e exportar os resultados. Em Silva *et al.* (2016) são descritas as etapas em detalhes.

#### 5.4 Pressão Antrópica e Grade Estatística do IBGE

As duas últimas seções deste capítulo descreveram as técnicas de geoprocessamento sobre os dados de somente um dos dois parâmetros usados para estudar a VRH. Esta abordará o outro parâmetro, denominado de *Pressão Antrópica* (PA). Por pressão antrópica, entende-se o potencial de alteração da paisagem por parte da população em razão de seu crescimento. De forma análoga, Barreto *et al.* (2005) fala em *human pressure* (pressão humana) em referência a variadas formas de ocupação do território, desde centros urbanos a assentamentos rurais.

Neste estudo, seu indicador é a densidade demográfica ou populacional, definida com base no número de habitantes por unidade de área, de acordo com a Equação 1.

$$Densidade\ Populacional = \frac{Habitantes}{Área} \quad (1)$$

Essa relação foi determinada com base na grade estatística do IBGE, estabelecida por Bueno (2014) e IBGE (2016). A grade estatística consiste em um recorte espacial, em forma de grade, formada por células regulares, com dimensões distintas para a área urbana, 200 m x 200 m (0,04 km<sup>2</sup>), e área rural, 1 km x 1 km (1 km<sup>2</sup>), o qual agrega informações sobre o território brasileiro, nesse caso, dados populacionais oriundos do Censo Demográfico, realizado em 2010. Esses dados incluem, por célula da grade, número de homens, número de mulheres e a população total, além, do número de domicílios e dimensão da célula em hectares (ha). Essas áreas compõem um sistema de grades regulares desenvolvidas a partir da necessidade de integrar dados estatísticos variados em áreas de estudo de dimensão e distribuição espacial irregular, como as bacias hidrográficas e unidades de conservação (BUENO, 2014; BUENO; D'ANTONA, 2014; D'ANTONA *et al.*, 2013)

De posse dessas informações, foi feito o recorte da grade para as três dimensões da área de estudo (MRMB, mesobacias e microbacias). Em seguida, a área de cada célula foi calculada em km<sup>2</sup>, para então se determinar a densidade populacional através da Equação 1. Com isso, definiu-se faixas de variação dos resultados de forma a associá-lo as quatro classes de LUCC. Essas faixas de variação correspondem às classes de Pressão Antrópica, determinadas em um

total de quatro classes, com o objetivo de manter relação numérica com o número de classes de LUCC. A Tabela 5 mostra a representação genérica de cada classe; os limites das faixas de 0 a 4 foram propostos de forma distinta para cada dimensão da área de estudo, com vistas à representação mais adequada da distribuição populacional de cada área.

Tabela 5 - Classes de Pressão Antrópica.

<b>Pressão Antrópica</b>	<b>-</b>	<b>Densidade Populacional (hab./km<sup>2</sup>)</b>
<i>Sem classificação*</i>		Faixa 0
<i>Baixa</i>		Faixa 1
<i>Moderada</i>		Faixa 2
<i>Alta</i>		Faixa 3
<i>Muito Alta</i>		Faixa 4

\*sem classificação (densidade populacional = 0,0 hab./km<sup>2</sup>).

Para definir a variação numérica de cada faixa, empregou-se o método de *Quebras Naturais* (*Natural Breaks*), presente no *software ArcGIS 10.1*. Esse baseia-se no chamado Método de Otimização de Jenks (*Jekns Optimization Method*), elaborado por Walter Fisher (1958) e implementado por George Jenks (1977), o qual, tem por fundamento estabelecer a quebra natural entre pontos dentro de um universo de dados, onde, haja a minimização entre os valores de uma mesma classe de dados e a maximização da diferença entre classes distintas, com base na soma dos desvios padrão sobre a mediana (DENT *et al.*, 2009).

Antes, é relevante mencionar que, nesse ponto, o trabalho adentrará no campo do mapeamento coroplético, que consiste na descrição quantitativa dos lugares (do grego, *choros* = lugar e *plethos* = quantidade), em outras palavras, a representação gráfica de informações espaciais do território, como é o caso da densidade populacional (DENT *et al.*, *op. cit.*).

Ao estudar os métodos de classificação de dados populacionais, através dos algoritmos do *software ArcGIS*, sendo eles o de Intervalos Iguais (*Equal Interval*), Quantil (*Quantile*), Quebras Naturais de Jenks (*Jenks Natural Breaks*) e de Desvio Padrão (*Standard Deviation*), Ramos *et al.* (2016), concluiu que o de Jenks é mais adequado para estudos dessa natureza, pois, foi o que apresentou os melhores resultados na visualização da heterogeneidade entre os objetivos estudados.

O método de *Quebras Naturais* consiste em três etapas fundamentais, com o objetivo de encontrar os limites das classes através do índice denominado de Melhor Ajuste de Variância (*GVF – Goodness of Variance Fit*). Primeiro, define-se o somatório do desvio quadrático para

cada elemento ( $x_i$ ) de uma mostra ( $N$ ) em relação à média amostral ( $\mu$ ), o chamado *SDAM* (*Squared Deviations, Array Mean*), por meio da Equação 2.

$$SDAM = \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \quad (2)$$

No segundo passo, é determinado o número de elementos presente em cada classe, por meio de outro índice, o *SDCM* (*Squared Deviations, Class Means*), o qual indica o somatório do desvio quadrático de cada elemento ( $x_i$ ), em relação à média dos elementos contidos em uma mesma classe ( $Z_c$ ). Deve-se saber, que o  $SDCM = 0$ , quando  $c = x_i$ , o que ocorre na primeira interação entre ambos, quando a média é igual ao número de interações. Pela Equação 3, onde  $K$  é o número de classes, têm-se.

$$SDCM = \sum_{c=1}^K \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{Z}_c)^2 \quad (3)$$

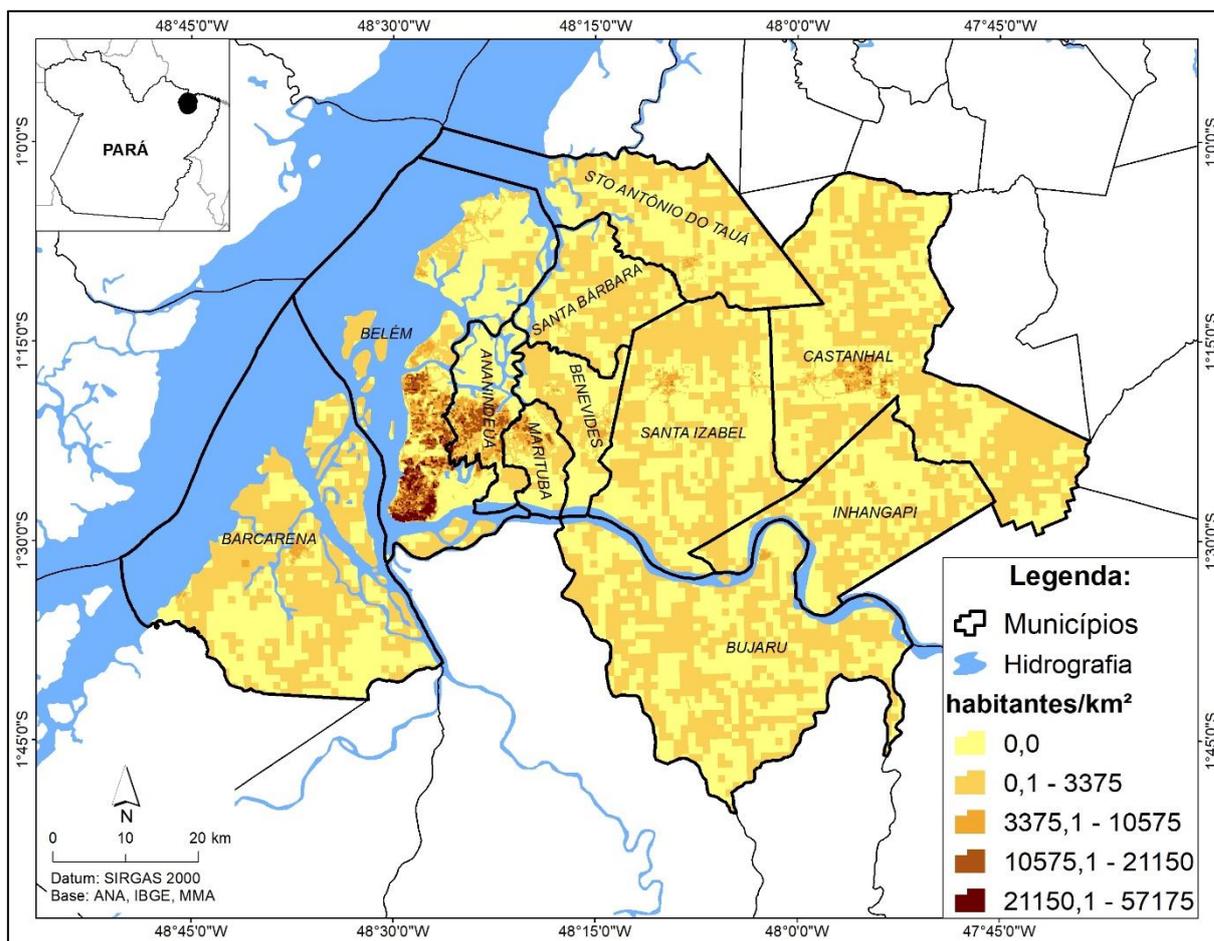
Então, *GVF* fica na forma da Equação 4.

$$GVF = \frac{SDAM - SDCM}{SDAM} \quad (4)$$

Portanto, o seguinte critério foi adotado para estipular as classes de Pressão Antrópica. As células que não apresentarem nenhum habitante farão parte da Faixa 0 e as demais faixas serão determinadas pelo método de Quebras Naturais, considerando a área de cada unidade de estudo. Assim, onde houver uma grande número de células sem habitantes se diminui a tendência de classificação como Pressão Antrópica do tipo Baixa, quando na verdade é uma pressão nula, sobre o ponto de vista aqui adotado.

Para efeito de exemplificação, toma-se toda a MRMB. Faz-se o recorte da grade estatística para essa área e aplica-se o algoritmo *Natural Breaks (Jenks)* do *ArcGIS*; levando em consideração as quatro classes (Faixa 1 a 4) e mais a classe nula (Faixa 0). A distribuição da Pressão Antrópica fica como mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Distribuição espacial das classes de Pressão Antrópica para a MRMB.



A grade que compreende a região tem um total de 26.238 células, sendo 14.593 com valor populacional igual a 0 (zero). Os valores mínimo e máximo são, respectivamente, 0 e 57.175 hab./km<sup>2</sup> e a média corresponde a 2.127,76 hab./km<sup>2</sup>. Então, são obtidas as classes de Pressão Antrópica segundo as faixas de densidade populacional. A Tabela 6 mostra essa diferenciação e mostra a área ocupada por cada classe.

Tabela 6 - Distribuição quantitativa das classes de Pressão Antrópica para a MRMB.

Pressão Antrópica	-	Densidade Populacional (hab./km <sup>2</sup> )	Área (km <sup>2</sup> )
Sem classificação		0,0	4.084,61
Baixa		0,1 - 3.375	2.951,61
Moderada		3.375,1 - 10.575	105,40
Alta		10.575,1 - 21.150	59,64
Muito Alta		21.150,1 - 57.175	17,84
<b>Total</b>			<b>7.218,19*</b>

\*A área total foi maior que a MRMB em razão de algumas células ultrapassarem esse limite territorial.

## 5.5 Determinação e Análise da Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos

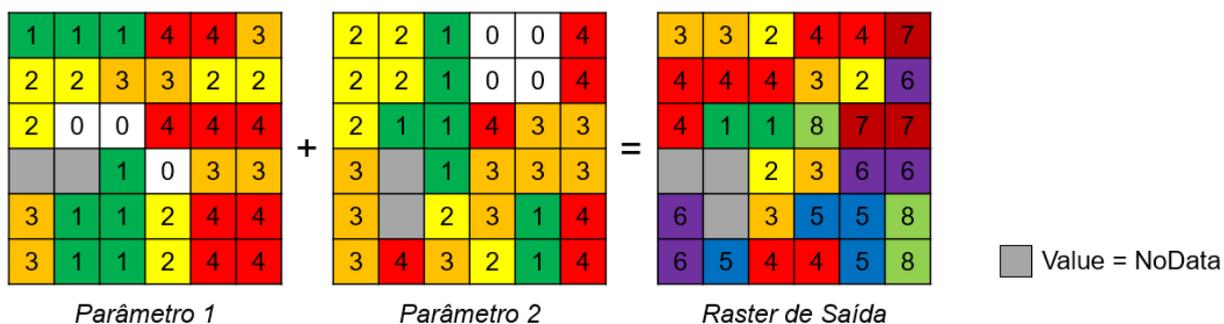
Observa-se que na literatura especializada a relação entre LUCC, crescimento populacional e vulnerabilidade, é tratada de forma generalizada no que tange a relação espacial existente entre as variáveis; a partir da análise de entidades geográficas amplas, como cidades, bairros, bacias hidrográficas ou, em casos mais restritos, setores censitários e propriedades rurais. Por exemplo, Santos *et al.* (2017) estudou a vulnerabilidade socioambiental da MRMB as mudanças climáticas ao nível dos municípios, mostrando como resultados que Belém e Ananindeua têm vulnerabilidade socioambiental baixa, enquanto Santo Antônio do Tauá apresenta o resultado alto. Da mesma forma, Pereira e Vieira (2016) determinaram índices para estudar a sustentabilidade na RMB, apresentando as causas da variação que há entre as cidades para cada grupo de indicadores.

O desenvolvimento metodológico para determinar o grau e extensão da vulnerabilidade dos recursos hídricos está fundamentada na relação espacial existente entre as variáveis que constituem as classes de LUCC, a partir da classificação supervisionada gerada pelo método GeoBIA, e as classes de Pressão Antrópica, a partir da densidade populacional da grade estatística do IBGE. Estes dois componentes proporcionaram o refinamento do nível de análise a partir da elaboração de um mapa síntese, resultado de sua associação. Por tanto, essa constitui uma Análise Multicritério onde, através da técnica de Álgebra de Mapas, os *pixels* de representações matriciais (*raster*) distintas, numa mesma posição geográfica, são associadas através de uma operação algébrica, estabelecida para o caso específico do fenômeno estudado (BARBOSA, 1997; SAMPAIO, 2012). A Equação 5 traz a representação genérica desse entendimento, com o cenário ( $C$ ), neste caso um cenário diagnóstico, do mapa síntese sendo função dos  $n$  parâmetros ( $P_n$ ) de entrada.

$$C = f(P_1, P_2, \dots, P_n) \quad (5)$$

A Figura 14 ilustra a representação espacial do resultado obtido por uma adição de dados *raster* como na equação anterior, onde o valor associado a cada *pixel* do Parâmetro 1 na linha  $i$  e coluna  $j$  é somado a valor daquele na mesma posição do Parâmetro 2. Os *pixels* sem valor integrado são designados como sem dados (*NoData*) e a operação que os envolvem geram também resultados sem dados (BARBOSA, 1997).

Figura 14 - Representação da operação de adição em Álgebra de Mapas.



Antes, é necessário fazer a conversão dos parâmetros de entrada a partir dos dados gerados nas etapas descritas nas seções 5.3 e 5.4, que estão na forma vetorial, para a matricial. Neste processo define-se a dimensão dos *pixels* que constituirão as imagens resultantes; neste caso, o valor utilizado foi de 10 para as mesobacias e 1 para as microbacias, resultando em imagens formadas por *pixels* de 10x10 metros (100 m<sup>2</sup>) e 1x1 metro (1 m<sup>2</sup>), respectivamente. A conversão é feita a partir das classes determinantes dos dois parâmetros base.

Em seguida, é necessário realizar a reclassificação das classes inserindo as ponderações para cada uma delas. Neste caso adotou-se a razão entre a unidade e o número de classes ( $n$ ), considerando que são quatro classes preponderantes para cada um dos parâmetros, a divisão da ponderação das classes ficou na forma de um quarto para cada variável ( $1/n = 1/4 = 0,25$ ), de acordo com o mostrado na Tabela 7, de forma a se eliminar a existência de tendências e flexibilizar os resultados, como apontado em outros métodos de análise multicriterial (FRANCISCO *et al.*, 2008).

Tabela 7 - Ponderação das variáveis que definem a VRH.

Parâmetros	Ponderação		Classes	Ponderação	Grau de VRH	
<i>Mudanças de Uso e Cobertura da Terra</i>	<i>LUCC</i>	0,5	Floresta	<i>w<sub>LUCC</sub></i>	0,25	Baixa
			Formações Secundárias		0,50	Moderada
			Não Floresta		0,75	Alta
			Áreas Antrópicas		1,00	Muito Alta
			Outras*		0,00	Sem Classificação
<i>Pressão Antrópica</i>	<i>PA</i>	0,5	Faixa 0	<i>w<sub>PA</sub></i>	0,00	Sem Classificação
			Faixa 1		0,25	Baixa
			Faixa 2		0,50	Moderada
			Faixa 3		0,75	Alta
			Faixa 4		1,00	Muito Alta

\*Hidrografia, Nuvem/Sombra e Áreas Não Classificadas.

Ainda na Tabela 7, foi considerado o mesmo grau de intensidade para os dois parâmetros base, sendo 0,5 (50%) a ponderação atribuída a cada um deles. Como a pressão antrópica, em seus diversos níveis, é considerada nesta pesquisa como a principal precursora das mudanças de uso e cobertura da terra, esse fato é visto como justificativa para tal entendimento.

A relação matemática que associa cada parâmetro ( $P$ ) ao seu respectivo peso ( $w$ ) está na forma da Equação 6.

$$C_{ij} = \sum_{i=1}^n P_i \times w_i = P_1 \times w_1 + P_2 \times w_2 + \dots + P_n \times w_n \quad (6)$$

Onde:  $C_{ij}$  representa a posição de um *pixel* na coluna  $i$  e linha  $j$  de um arquivo *raster*;  $w$  é o valor da ponderação (ou peso) atribuída a um determinado parâmetro  $P$  de uma classe  $n$ .

Com base nas Equações 5 e 6, a relação que estabelece a Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos com base nos parâmetros LUCC e Pressão Antrópica é definida na forma.

$$VRH = LUCC + PA \quad (7)$$

Onde, aplicando-se as respectivas ponderações de classe de cada um dos parâmetros, temos.

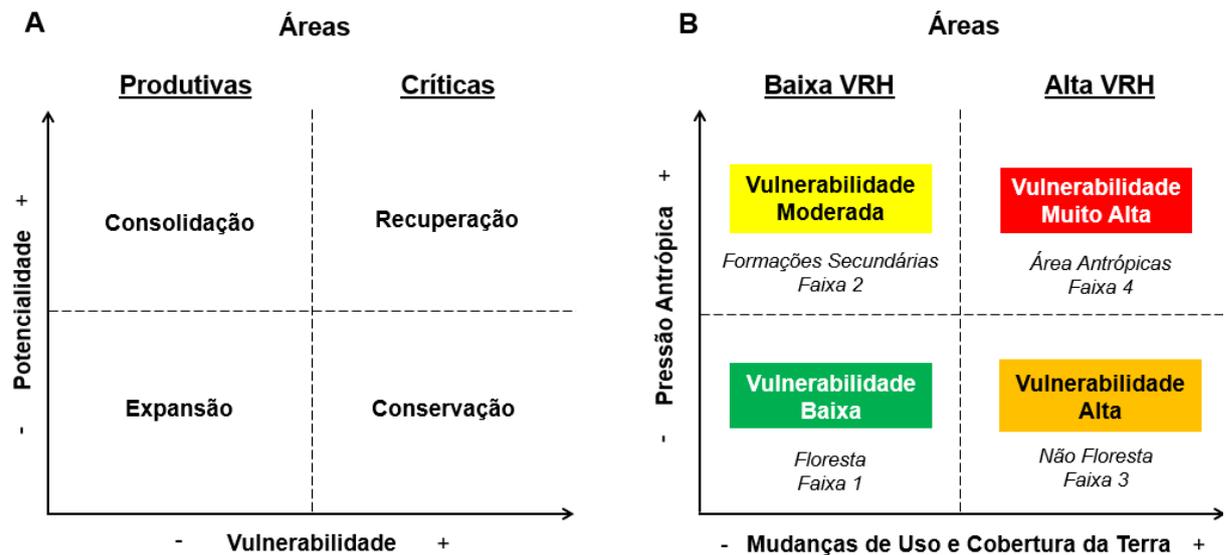
$$VRH = LUCC \times w_{LUCC} + PA \times w_{PA} \quad (8)$$

Onde,  $w_{LUCC}$  e  $w_{PA}$ , são as ponderações das classes que constituem os parâmetros  $LUCC$  e  $PA$ , respectivamente. Sabendo que  $LUCC$  e  $PA$  correspondem a 50% (0,5) do peso da VRH cada, da mesma forma como  $w_{LUCC}$  e  $w_{PA}$  assume os valores da Tabela-7. Assim, por exemplo, um determinado *pixel* que assuma os valores das classes de Áreas Antrópicas ( $w_{LUCC} = 1,00$ ) em  $LUCC$  e a Faixa 4 ( $w_{PA} = 1,00$ ) em  $PA$ , terá o grau de  $VRH = 0,5 \times 1,00 + 0,5 \times 1,00 = 1,00$ , sendo, por tanto, de grau Muito Alto de VRH.

A fim de estabelecer uma síntese prática para os resultados obtidos, a partir da Equação 7, foi elaborada uma analogia entre os graus de vulnerabilidade e a classificação definida para o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) para a Amazônia Legal, detalhado em Becker e Egler (1996). Neste, o território é dividido em *Áreas Produtivas*, que podem ser de Consolida-

ção ou destinadas a Expansão, e *Áreas Críticas*, que podem ser de Conservação ou Recuperação. Dessa forma, têm-se as áreas de Vulnerabilidade Alta e Muito Alta como críticas, devido a predominância de uso da terra e pressão antrópica nas faixas 3 e 4. Assim como, as de Vulnerabilidade Baixa e Moderada como áreas produtivas, variando entre as classes de cobertura da terra e faixas 1 e 2 de pressão antrópica. A Figura 15 mostra como essa comparação foi elaborada.

Figura 15 - Comparação entre ZEE e os graus de VRH.



Fonte: Adaptado de Becker e Egler (1996).

A. Unidades territoriais do ZEE; B. Graus de VRH.

Assim, obtêm-se os intervalos para classificação da variação dos graus de vulnerabilidade, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Classificação dos graus de VRH.

<b>Grau</b>	-	<b>VRH</b>
<i>Baixa</i>		$0,00 < VRH \leq 0,25$
<i>Moderada</i>		$0,25 < VRH \leq 0,50$
<i>Alta</i>		$0,50 < VRH \leq 0,75$
<i>Muito Alta</i>		$0,75 < VRH \leq 1,00$

O entendimento acerca de cada um dos graus de VRH é o que segue:

- O grau de *Vulnerabilidade Baixa dos Recursos Hídricos*, denota a presença da classe de cobertura da terra do tipo Floresta, composta pelos remanescentes de vegetação primária ainda existentes ao longo dos cursos d'água, principalmente, nas mesobacias e em pontos onde há a proteção legal dos meios institucionais, como em unidades de conservação e áreas sob domínio das forças armadas. Por conseguinte, o parâmetro pressão antrópica é menor, com a razão de habitantes por km<sup>2</sup> sendo baixa;
- A *Vulnerabilidade Moderada dos Recursos Hídricos*, também está associada a uma classe de cobertura da terra, nesse caso, a de Formações Secundárias, áreas em estágios distintos de sucessão ecológica, desde iniciais até avançados, mantendo características importantes do ecossistema predecessor na proteção dos cursos d'água, além, pressão antrópica não alta suficiente para exercer grande influência para que a dinâmica da paisagem se altere para uma classe de uso terra;
- Já a *Vulnerabilidade Alta dos Recursos Hídricos* inclui uma classe de uso da terra, denominada de Não Floresta, onde o elemento da paisagem dominante é composto por formações rasteiras e onde a densidade populacional atingiu um nível considerável, através de onde a proteção dos cursos d'água se tornou deficitária; e
- As regiões de *Vulnerabilidade Muito Alta dos Recursos Hídricos*, englobam os grandes núcleos urbanos, densamente ocupados, formadas pelas regiões centrais das cidades, povoados já consolidados, áreas ocupadas as margens das principais rodovias e cursos d'água, entre outras.

Em conclusão, a metodologia construída para o estudo da vulnerabilidade no âmbito dos recursos hídricos, apresentada neste capítulo, fornece o entendimento teórico-conceitual necessário para analisar a área de estudo, de acordo com os objetivos propostos. E, observa-se que o modelo desenvolvido apresenta versatilidade suficiente para ser aplicado em outros territórios. O emprego de imagens de altíssima resolução espacial é sem dúvida um diferencial, ponto este que pode ser adaptado de acordo com a disponibilidade de dados. Já há a disposição do público, por exemplo, produtos dos sensores de programas como o Sentinel e o RapidEye, que fornecem resoluções espaciais de 10 e 5 metros, respectivamente.

## 5.6 Análises Complementares

As análises complementares são aquelas aplicadas dos resultados obtidos com a metodologia principal, sendo representadas pelo estudo da estrutura da paisagem, a partir das informações de LUCC da MRMB, e pelo estudo da zona ripária, com a determinação de conflitos de ocupação da terra em áreas de preservação permanente (APP), através dos dados da VRH das bacias hidrográficas.

### 5.6.1 Estrutura da Paisagem

As mudanças na cobertura da terra ocasionam modificações na estrutura da paisagem que têm como consequências a fragmentação florestal e a perda de habitats. No contexto dos recursos hídricos, essas modificações ocasionam impactos de diversos níveis, desde o aumento dos processos erosivos até alterações na qualidade dos corpos d'água e comprometimento da zona ripária (ATTANASIO *et al.*, 2012; METZGER, 2010). Portanto, no estudo dos fenômenos de vulnerabilidade é fundamental estudar essas alterações e conhecer sua dinâmica temporal.

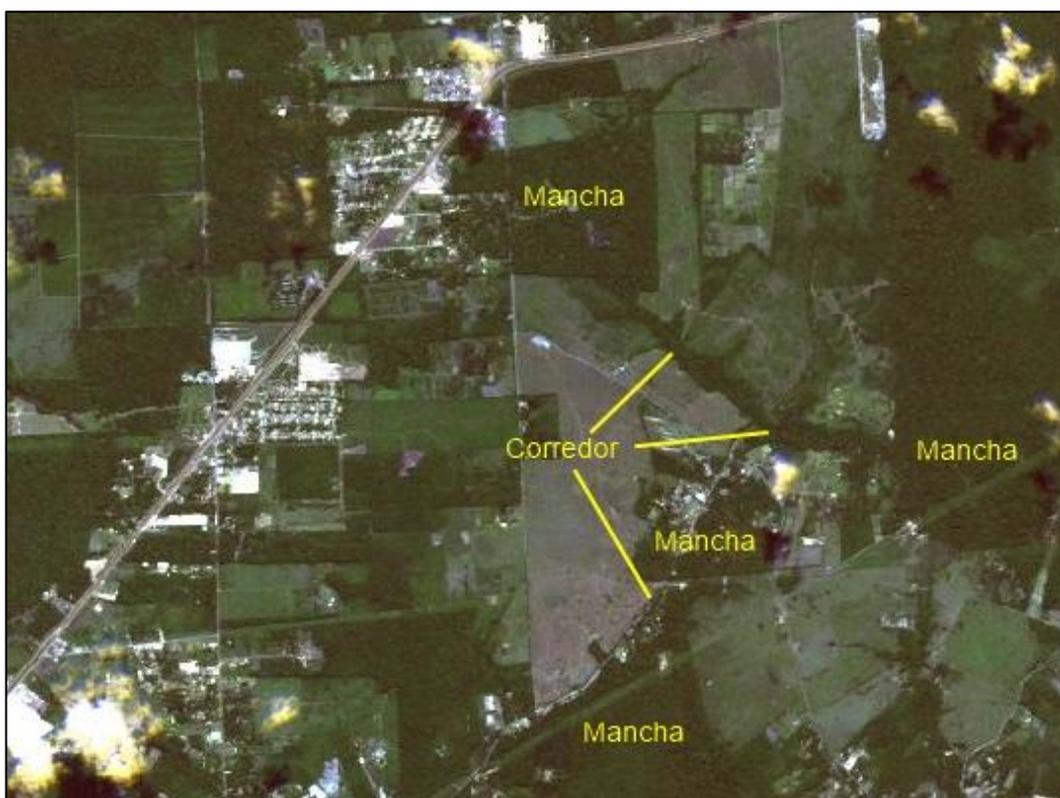
Sobre a *paisagem*, Metzger (2001) a define como “um mosaico heterogêneo formado por unidades interativas, sendo esta heterogeneidade existente para pelo menos um fator, segundo um observador e numa determinada escala de observação”. Onde, a *Estrutura* é uma de suas três características fundamentais, pois, é caracterizada pela relação espacial entre os elementos (fluxos de energia, matéria e espécies) e as diversas formas, tamanhos, quantidades e tipologias dos ecossistemas; influenciando na *Função* desses componentes e as *Mudanças* que ocorrem nos dois primeiros ao longo do tempo (MCGARIGAL; MARKS, 1995). Sendo esses o escopo da Ecologia da Paisagem.

A *Ecologia da Paisagem* é o campo de estudo em que essas alterações mencionadas no início desta sessão se enquadram. Odum e Barrett (2011), ao fazerem uma revisão histórica do desenvolvimento dessa área do conhecimento, comentam que a ação humana é determinante para as modificações na paisagem, com respostas ecológicas recíprocas que podem ser analisadas em diversas dimensões espaciais e temporais. Para essa finalidade é comum a quantificação de métricas da paisagem auxiliada pela análise de imagens de satélite (METZGER, 2010).

Esse estudo perpassa pelos três componentes principais da paisagem: a *matriz*, as *manchas* e os *corredores*. As manchas e os corredores da paisagem estão inseridos na matriz, o seu elemento de maior dimensão territorial, que representa um ecossistema natural ou artificial

(agroecossistema). As manchas têm formação aproximadamente homogênea, distinta da matriz que as contém. E os corredores interligar duas manchas de mesma formação através de faixas contínuas (METZGER, 2001; PEREIRA *et al.*, 2001). Como exemplo, tem-se a área de estudo do referido trabalho, onde um ecossistema outrora formado, essencialmente, por uma matriz de floresta tropical, deu lugar a manchas desse mesmo ecossistema, inseridas numa matriz dominada por pastagens, como na Figura 16.

Figura 16 - Elementos da paisagem em imagem RapidEye de Santa Izabel do Pará.



As métricas empregadas foram baseadas nos oito grupos de categorias calculadas pelo *software* Fragstas<sup>®</sup>, descritas em (MCGARIGAL; MARKS, 1995). Além daquelas indicadas em pesquisas realizadas por outros autores na região (PEREIRA *et al.*, 2001; PEREIRA *et al.*, 2012; TAMASAUSKAS *et al.*, 2016). Entre essas, destacam-se as descritas na Tabela 9

Vale ressaltar que, %LAND é um resultado direto da mensuração das classes de LUCC, fruto das técnicas de classificação supervisionada. A partir disso, as demais métricas vêm a fornecer dados adicionais para o entendimento das alterações, onde, é possível verificar qual classe influência mais a alteração do tamanho ou das quantidades de manchas, por exemplo.

Tabela 9 - Métricas de paisagem utilizadas.

Métrica	Equação	Conceito	Nº/Variação/Unidade
Porcentagem da Paisagem (%LAND)	$\%LAND = \left( \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \right) \times 100$	Área que uma determinada classe ocupa em relação à área total da paisagem.	Equação 9: $0 < \%LAND \leq 100$ (%)
Número de Manchas (NP)	$NP = n_i$	Número de manchas totais que formam uma classe ou todas as manchas que constituem a paisagem.	Equação 10: $NP \geq 1$ (Unidade)
Índice da Maior Mancha (LPI)	$LPI = \frac{\max_{j=1}^n a_{ij}}{A} \times 100$	Representa o quanto da classe ou da paisagem é ocupado pela maior mancha.	Equação 11: $0 < LPI \leq 100$ (%)
Índice de Forma da Paisagem (LSI)	$LSI = \frac{0,25 \times \sum_{k=1}^m e_{ik}^2}{\sqrt{A}}$	Relaciona perímetro e área das manchas de uma classe, indicando a irregularidade das manchas.	Equação 12: $LSI \geq 1$ (Adimensional)

Fonte: Elaborado com base em Batistella e Moran (2005), McGarigal e Marks (1995) e Pereira *et al.* (2001).

A: área total da paisagem, em m<sup>2</sup>; n<sub>i</sub>: número total de manchas de uma classe i na paisagem; j: número de manchas; a<sub>ij</sub>: área de uma determinada mancha ij, em m<sup>2</sup>; e<sub>ik</sub>: comprimento total, em metros, das bordas na paisagem entre as manchas i e k.

Essas métricas foram aplicadas sobre os resultados de LUCC de ambos os grupos de bacias hidrográficas.

Essas métricas serão aplicadas em dois momentos. Primeiro, sobre os resultados de LUCC sobre a MRMB como um todo e, depois, sobre as classes de vulnerabilidade, de forma a determinar-se zonas de pressão sobre os recursos hídricos. No segundo caso, como a relação das classes de uso e cobertura é feita somente com mais um parâmetro, o de Pressão Antrópica, julgou-se que o emprego das métricas sobre os resultados final seria mais representativo para o julgamento de zonas de pressão, já que, as localidades de maior aglomeração populacional são as que proporcionam as maiores modificações da paisagem natural.

### 5.6.2 Zona Ripária e Conflitos de Ocupação em APP

A vegetação, em diversos estágios de desenvolvimento, localizada nas margens dos cursos d'água recebe diferentes denominações, como área ripária, floresta ripária, floresta ciliar, floresta de galeria, mata aluvial, mata ciliar, formação ribeirinha e zona ripária, esses conceitos

variam entre os autores e também de região para região no Brasil. Kobiyama (2003), a revisar o desenvolvimento histórico da terminologia recomenda o uso de zona ripária, pois, este transmite a visão tridimensional desse ecossistema, formado pela vegetação, pelo solo e o pelo próprio rio.

As zonas ripárias são ecótonos, ecossistemas de transição, entre os ecossistemas aquático e terrestre. São áreas de importância não só para o meio físico como também para o biótico. Elas têm relevância no regime hidrológico das bacias, pois, influenciam no escoamento superficial e subsuperficial, além de controlar a erosão das margens dos rios, a temperatura e qualidade da água, como um efeito tampão, assim como, serem apresentarem críticas para o estudo da paisagem (ATTANASIO *et al.*, 2012; NRC, 2002; ZAKIA *et al.*, 2009).

Por exemplo, Leal *et al.* (2017), ao estudarem a zona ripária de oitenta e três microbacias distribuídas nos municípios paraenses de Paragominas e Santarém, mostraram a sua importância para a conservação da fauna aquática, porém, concluíram que a legislação vigente pode ser ineficaz quando os efeitos em toda a bacia são considerados, como os casos de propriedades com agricultura mecanizada e com a proximidade de estradas.

Com os produtos de LUCC nas bacias de pequena e média dimensões é possível determinar a extensão dos remanescentes florestais da zona ripária, assim como, descrever a estrutura da paisagem comentada na seção 5.6.1. Além disso, tendo como base as determinações do Código Florestal Brasileiro, lei nº 12.651 de 25/05/2012, foi estabelecida a delimitação das APP e o estudo das áreas de conflito de ocupação da terra, ou seja, a quantificação das mudanças de uso presentes dentro dos seus limites territoriais. As determinações dessa legislação constam na Tabela 10, segundo as tipologias de APP observadas na MRMB.

Tabela 10 - Faixas marginais mínimas de APP.

<b>Tipo de APP</b>	<b>Faixa Marginal Mínima (metros)</b>
<i>Cursos d'água &lt; 10 m</i>	30
<i>Cursos d'água 10 – 50 m</i>	50
<i>Cursos d'água 50 – 200 m</i>	100
<i>Cursos d'água 200 – 600 m</i>	200
<i>Cursos d'água &gt; 600 m</i>	500
<i>Lagos e lagos naturais &gt; 20 ha (zona rural)</i>	100
<i>Lagos e lagos naturais ≤ 20 ha (zona rural)</i>	50
<i>Lagos e lagos naturais (zona urbana)</i>	30
<i>Nascentes e olhos d'água perenes</i>	50

Fonte: Elaborado com base na Lei nº 12.651/2012.

A delimitação das APP se dá pela geração de *buffers*, a partir das margens dos rios seguindo esses parâmetros, com auxílio do *software ArcGIS*<sup>®</sup>. As áreas de conflitos serão definidas como aquelas onde há a presença de classes de uso e cobertura da terra diferentes da classe de Floresta, a qual representa os remanescentes de vegetação primária. Além disso, será analisada a distribuição das classes de VRH dentro desses limites.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Mudanças de Uso e Cobertura da Terra na MRMB

Os resultados subsequentes correspondem a variação espaço-temporal de uso e cobertura da terra na MRMB. Os dados apresentados são resultado da aplicação de classificação supervisionada pelo método MaxVer em imagens Landsat, analisados em conjunto com informações do projeto TerraClass.

Os dados preliminares mostram variação oposta entre as classes de cobertura da terra. Enquanto a classes Floresta (FL) diminuiu no início do período e aumentou no final, passando de 3.117,76 km<sup>2</sup> (45,18%) para 2.097,13 km<sup>2</sup> (30,39%), 2.761,12 km<sup>2</sup> (40,01%) e 2.602,79 km<sup>2</sup> (37,71%), na ordem cronológica, respectivamente, a de Formações Secundárias (FS) primeiro aumentou de 1.279,92 km<sup>2</sup> (18,55%) em 1984 para 2.313,11 km<sup>2</sup> (33,52%) em 1994, para depois diminuir 1.220,71 km<sup>2</sup> (17,69%), em 2008, e 1.079,07 km<sup>2</sup> (15,64%), em 2017. Em parte, esse antagonismo se deve as confusões que podem ocorrer devido aos valores de reflectância dessas classes serem próximos, sobretudo da vegetação secundária em estágio avançado de sucessão que se assemelha a vegetação primária.

Por outro lado, as classes de uso da terra apresentaram tendência geral de aumento. O grupo Não Floresta (NF) ocupava 8,78% dos 6.901,35 km<sup>2</sup> da MRMB, em 1984, passando a ocupar 19,19% desta em 2017. No mesmo período, as Áreas Antrópicas (AA) passaram de 577,29 km<sup>2</sup> (8,39%) para 548,54 km<sup>2</sup> (7,95%). Esperava-se que a classe AA fosse sempre crescente, porém foi verificada queda seguida de elevação; observa-se que áreas com solo exposto, por exemplo, no município de Bujaru foram classificadas nessa classe em 1984 e em 1994 passaram a classe de NF, principalmente na forma de pastagem. A Figura 17 mostra a variação quantitativa das classes de LUCC na área de estudo e a Figura 18 mostra sua distribuição no espaço e período estudado.

Figura 17 - Variação das classes de uso e cobertura da terra na MRMB, em km<sup>2</sup>.

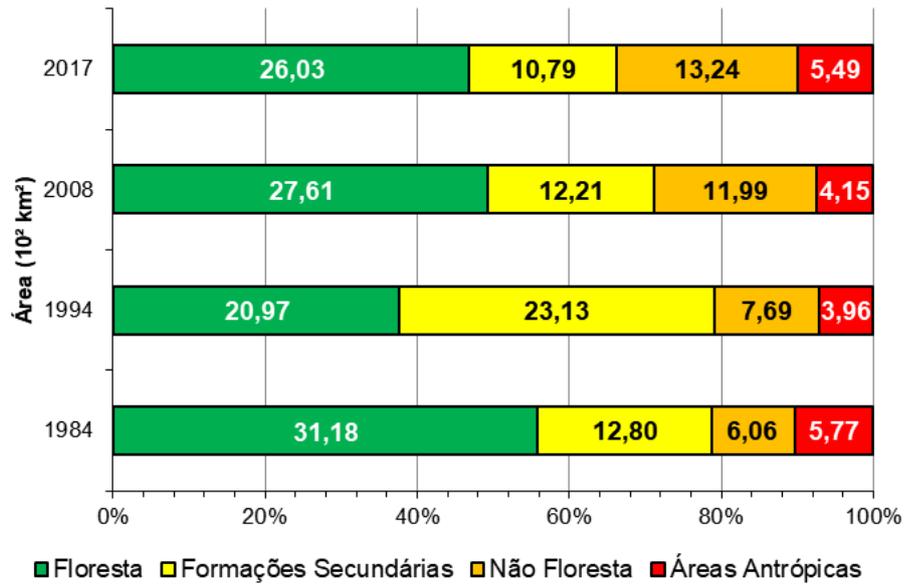
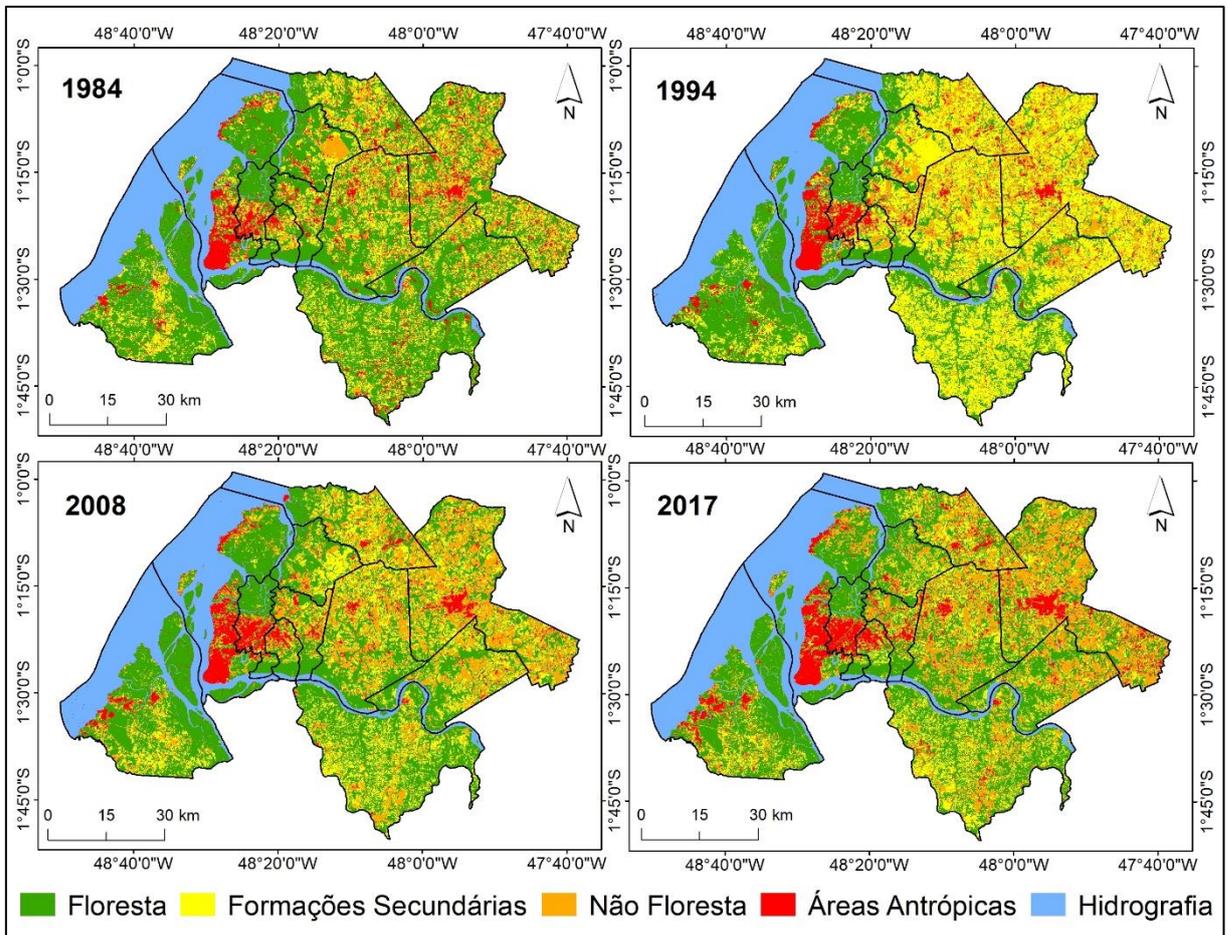
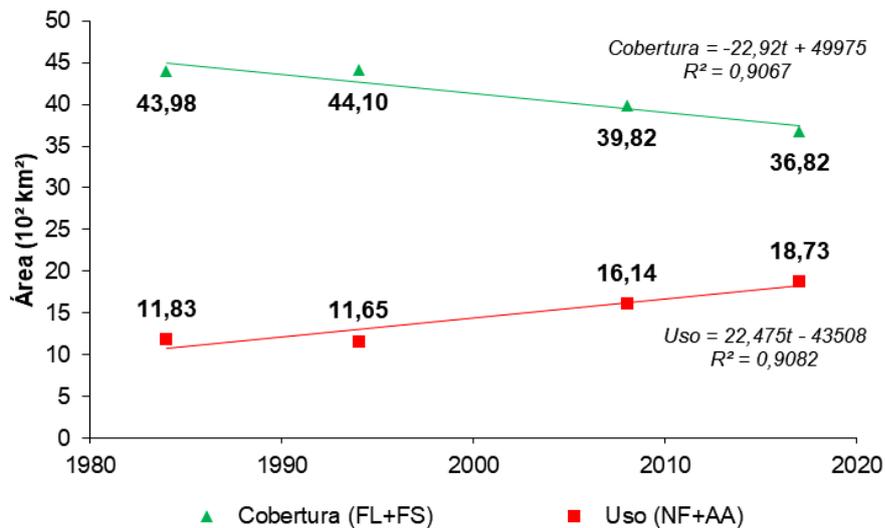


Figura 18 - Distribuição espaço-temporal das classes de uso e cobertura da terra.



Apesar das variações não esperadas nas classes de FL e AA, quando os grupos de cobertura (FL+FS) e uso (NF+AA) da terra foram agrupados, observou-se a tendência de diminuição do primeiro e aumento do segundo ao longo do período estudado (Figura 19), com o ano de 1994 levando essa inclinação no sentido oposto em ambos os casos. Assim, o que se constata é a substituição das formas de cobertura pelas de uso, com destaque para a mudança de FS pela de NF. Entre 1994 e 2008, FS apresentou variação negativa de 15,83% e entre 2008 e 2017 variação positiva de 14,97%; já FL exibiu variação positiva de 9,62% e negativa de -14,79%, nos mesmos intervalos.

Figura 19 - Agrupamento das classes de LUCC na MRMB, em km<sup>2</sup>.



Também, a Figura 19 contém as equações de regressão linear que caracterizam a variação temporal dessas classes, além de seus respectivos coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>), que são as seguintes:

$$Cobertura = -22,92t + 49975 \quad (12)$$

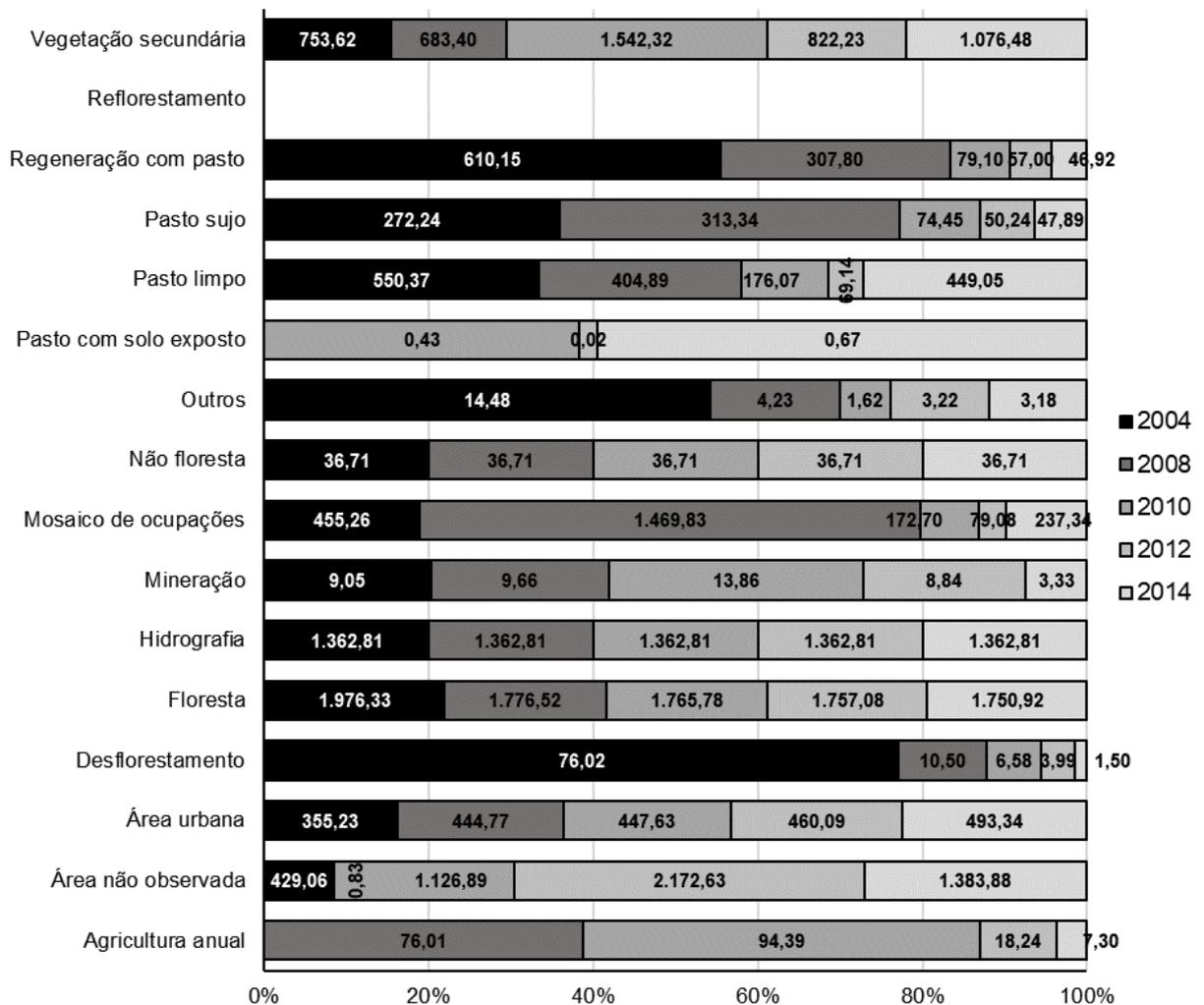
$$Uso = 22,475t - 43508 \quad (13)$$

Sendo os grupos de LUCC as variáveis dependentes e a sua variação no tempo  $t$ , em anos, a variável independente, ao igualar-se as equações 12 e 13, obtêm-se a estimativa do período em que esses serão equivalentes. Para este caso  $t = 2.059,32$ . Isto indica que durante o

ano de 2059 ambas as classes serão iguais e, mantendo-se a tendência, o Uso irá superar, quantitativamente, a Cobertura da terra. Com valores de  $R^2$  de, aproximadamente, 0,90 para ambas as equações, sendo, portanto, uma estimativa de classificação excelente (MEYER, 2012).

Os dados da classificação fornecem um panorama de amplitude temporal grande. Entre 1984 e 2017 são trinta e três anos representados em quatro anos separados por uma década ou mais cada. Assim, informações secundárias do TerraClass foram usadas para ajudar na caracterização da área de estudo em uma década entre os anos de 2004 e 2014, em cinco anos separados por intervalos de dois anos. A Figura 20 mostra a distribuição dessas na MRMB, onde, entre outras coisas, observa-se a diminuição das áreas de floresta e aumento da área urbana. As demais classes, como as de Vegetação Secundária, Pasto, Mineração e Desflorestamento variaram irregularmente ao longo do período.

Figura 20 - Distribuição das classes do TerraClass, em km<sup>2</sup>.

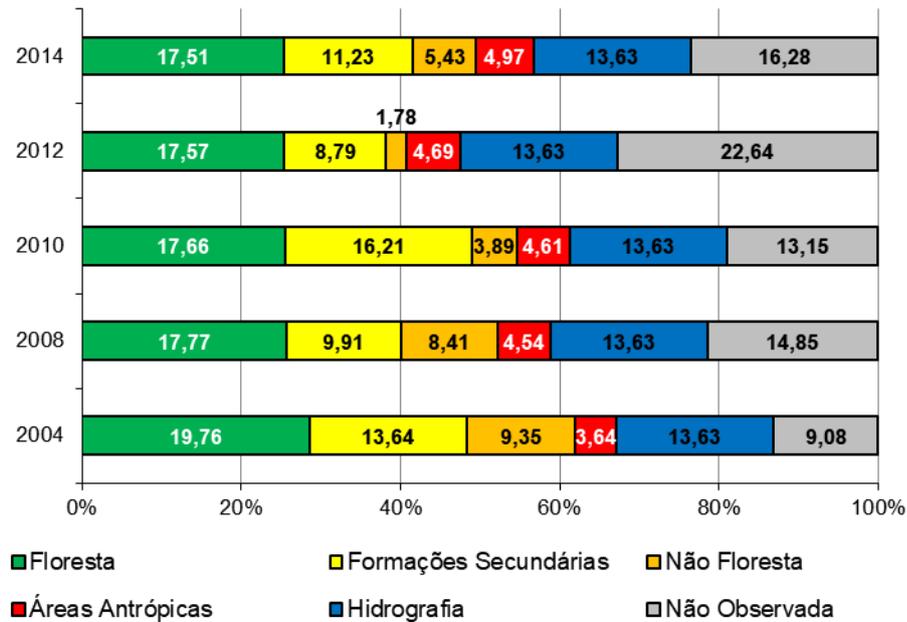


Ainda, as áreas não observadas, aquelas com cobertura de nuvens, apresentaram valor elevados a partir de 2010, chegando a 2.172,63 km<sup>2</sup> (31,48%) em 2012, o que prejudica as análises. Já a classe de Não Floresta é entendida de forma distinta feita pela classificação, sendo áreas pertencentes a diferentes fitofisionomias de vegetação não florestal, como regiões de savana, campos, lavrados e campinarana, por exemplo; porém estas são todas áreas de cobertura e não de uso da terra, como a classe NF da classificação.

Os dados da Figura 20 foram agrupados para coincidir com as classes definidas pela pesquisa, afim de estabelecer analogia entre as informações. A Figura 21 mostra o resultado dessa interação, que foi elaborada segundo os critérios da Tabela 11.

Tabela 11 - Associação entre as classes de LUCC e do TerraClass.

<b>Classes LUCC</b>	<b>Classes TerraClass</b>
<i>Floresta</i>	Floresta
<i>Formações Secundárias</i>	Regeneração com pasto Reflorestamento Vegetação secundária
<i>Não Floresta</i>	Agricultura anual Desflorestamento Não Floresta Pasto com solo exposto Pasto limpo Pasto sujo
<i>Áreas Antrópicas</i>	Área urbana Mineração
<i>Outras</i>	Área não observada Hidrografia Mosaico de ocupações Outros

Figura 21 - Dados do TerraClass agrupados pelas classes de LUCC, em km<sup>2</sup>.

Os resultados (1984 a 2017) coincidem com o descrito para a região por Cardoso *et al.* (2012), Trindade Jr. e Santos (2011), Veloso (2011), onde o processo de crescimento da MRMB ocorreu a partir dos eixos viários, tendo como marco a urbanização e a integração de um corredor a partir de Belém indo em direção a Castanhal; e a fixação ao longo destes de diversas atividades do setor produtivo, destacadamente a agricultura e a pecuária, que inicialmente se expandiram ao redor das rodovias e depois, em direção a Costa Atlântica e ao rio Guamá. Carmo e Costa (2017) afirmam que Belém por concentrar uma grande quantidade de serviços é responsável pelo funcionamento de uma área “core”, mesmo sem a infraestrutura socioeconômica adequada para manter as demandas de uma Região Metropolitana, atuando assim como uma cidade primaz, estabelecendo uma relação direta com as demais cidades componentes da área metropolitana.

A questão hídrica é destaque, pois as mudanças de LUCC ocorreram ao longo do divisor topográfico entre a bacia do rio Guamá e as bacias que drenam para o Atlântico, alterando assim as áreas de cabeceiras necessárias para a recarga destes sistemas hídricos e favorecendo problemas diversos, tais como, o aumento da erosão nas margens dos canais e sedimentação destes, gerando um incremento do efeito das cheias sazonais (BENINI; MENDIONDO, 2015; MACHADO; SILVA, 2016; VASCONCELOS *et al.*, 2018). Mansur *et al.* (2016) apresentam que mais de 1,2 milhão de pessoas estão expostas ao risco de inundação ocasionados por eventos extremos nas regiões metropolitanas de Belém (RMB) e Macapá (RMM), onde destas pessoas em risco, cerca de 686 mil vivem RMB.

## 6.2 Resultados dos Parâmetros de Vulnerabilidade

Esta seção traz os resultados de ambos os parâmetros que compõem o estudo da VRH: Pressão Antrópica e Uso e Cobertura da Terra.

### 6.2.1 Zonas de Pressão Antrópica nas Bacias Hidrográficas

De acordo com a metodologia proposta, a Pressão Antrópica foi determinada em função da densidade populacional, a partir da Grade Estatística do IBGE. Para o estabelecimento das classes de variação dos dados, com o intuito de associá-las as classes de LUCC, foram delimitadas cinco faixas, variando da Faixa 0 onde não há habitantes na grade, até a Faixa 4 para o limite máximo, pelo método de Quebras Naturais. A Tabela 12 mostra os limites superiores dos intervalos de classe em hab./km<sup>2</sup> para cada bacia hidrográfica.

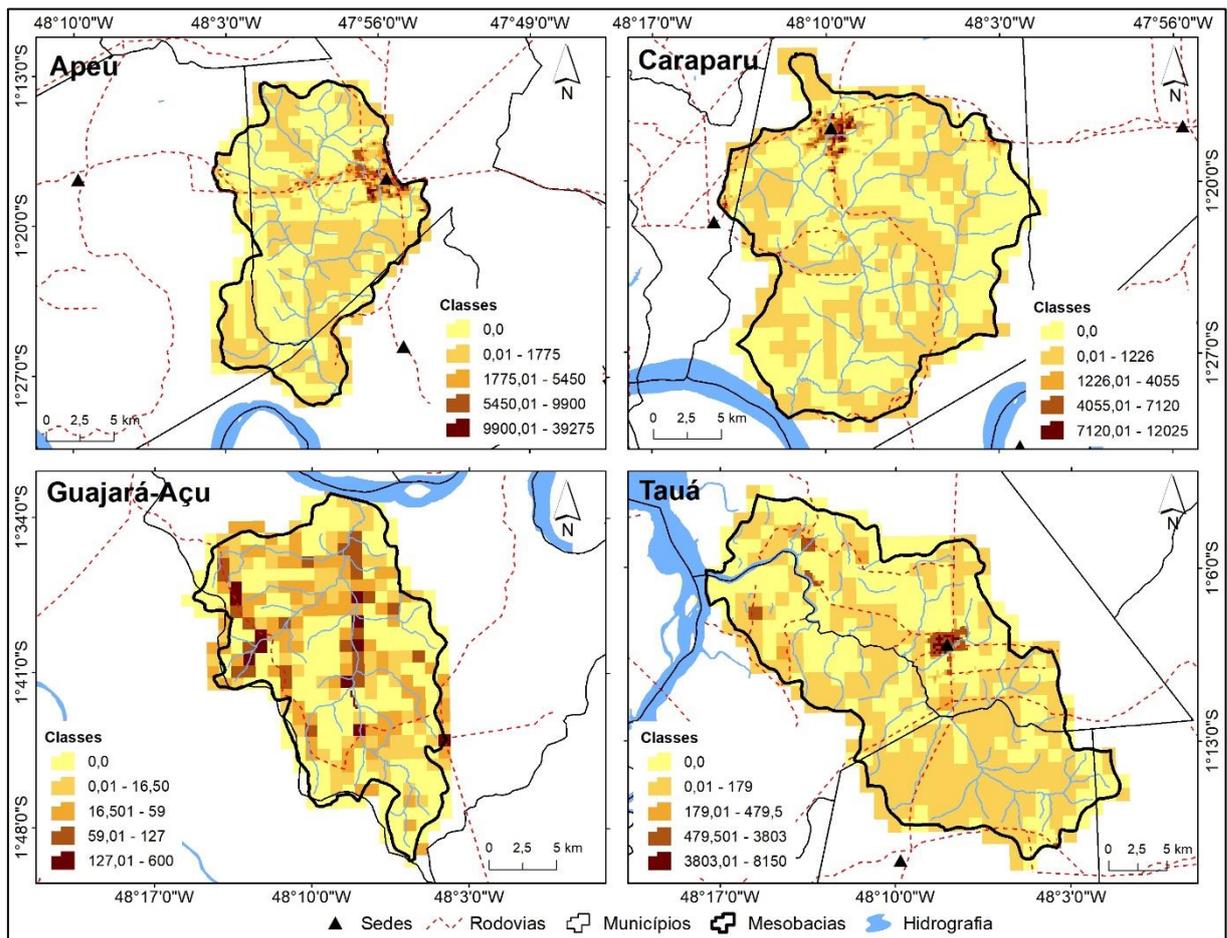
Tabela 12 - Limites superiores das classes de Pressão Antrópica.

Mesobacias (hab./km <sup>2</sup> )				
Classes	Apeú	Caraparu	Guajará-Açu	Tauá
<i>Faixa 0</i>	0	0	0	0
<i>Faixa 1</i>	1.775	1.226	16,5	479,5
<i>Faixa 2</i>	5.450	4.055	59	1.790
<i>Faixa 3</i>	9.900	7.120	127	3.803
<i>Faixa 4</i>	39.275	12.025	600	8.150
Microbacias (hab./km <sup>2</sup> )				
Classes	Ariri	Aurá	Maguari-Açu	Murutucum
<i>Faixa 0</i>	0	0	0	0
<i>Faixa 1</i>	3.175	2.550	2.875	2.430
<i>Faixa 2</i>	8.900	7.125	8.325	7.965
<i>Faixa 3</i>	15.600	11.200	13.875	15.795
<i>Faixa 4</i>	37.625	16.350	22.750	34.425

Especialmente, os dados da tabela anterior evidenciam as zonas de pressão em cada unidade de estudo para esse parâmetro, bem como, a característica individual de cada bacia. Por exemplo, a mesobacia do rio Apeú apresentou valor máximo de 39.275 hab./km<sup>2</sup>, enquanto a mesobacia do rio Guajará-Açu teve o valor máximo de 600 hab./km<sup>2</sup>. Para as microbacias, a do rio Ariri atingiu o maior índice, com 37.625 hab./km<sup>2</sup> e a do Aurá o menor, com 16.350 hab./km<sup>2</sup>. A Figura 22 mostra a distribuição da Pressão Antrópica na mesobacias e a Figura 23

na microbacias. Observa-se que há uma distribuição característica de cada unidade de estudo, corroborando para a adoção de diferentes limites de classe para cada área. Nas bacias de tamanho médio, por exemplo, devido a sua maior área de abrangência, as maiores densidades populacionais se restringem aos centros das principais cidades e a presença de localidades onde comunidades se consolidaram. A bacia do rio Guajará-Açu é uma exceção, como é pouco povoada os valores dos arranjos das classes não é tão grande quanto nas demais.

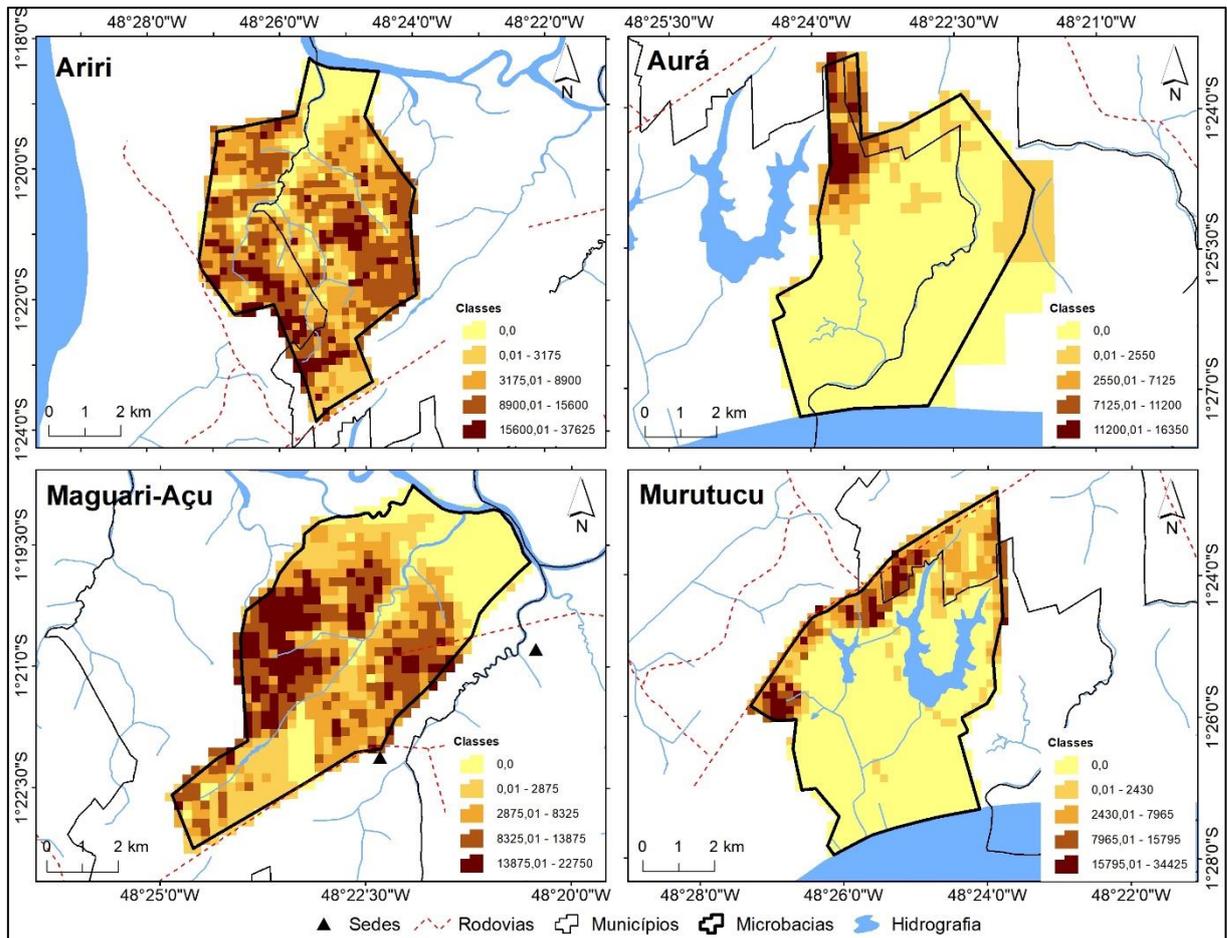
Figura 22 - Pressão Antrópica nas Mesobacias.



Nas microbacias os cenários são distintos dos observados nas Mesobacias, quanto a forma como a concentração populacional se comporta. Onde, a alta densidade populacional está mais condicionada ao processo de urbanização da MRMB, descrita em Tavares (2008) e Trindade Jr. (2016). As bacias dos rios Ariri e Maguari-Açu, que estão sobre o setor de influência do Furo do Maguari, apresentam ocupação mais intensa e distribuída em todo o seu território, com pontos sem ocupação próximo de seus exutórios, regiões onde ainda há presença de remanescentes florestais, como poderá ser visto na próxima seção.

Já as bacias dos rios Aurá e Murutucum estão localizadas no setor de influência do Rio Guamá, têm suas ocupações concentradas na porção extremo norte e a maior parte de sua área sem ocupação, em razão da presença de unidades de conservação, como, o Parque Estadual do Utinga, a Área de Proteção Ambiental (APA) da Região Metropolitana de Belém e o Refúgio da Vida Silvestre (RVS) Metrôpole da Amazônia.

Figura 23 - Pressão Antrópica nas Microbacias.



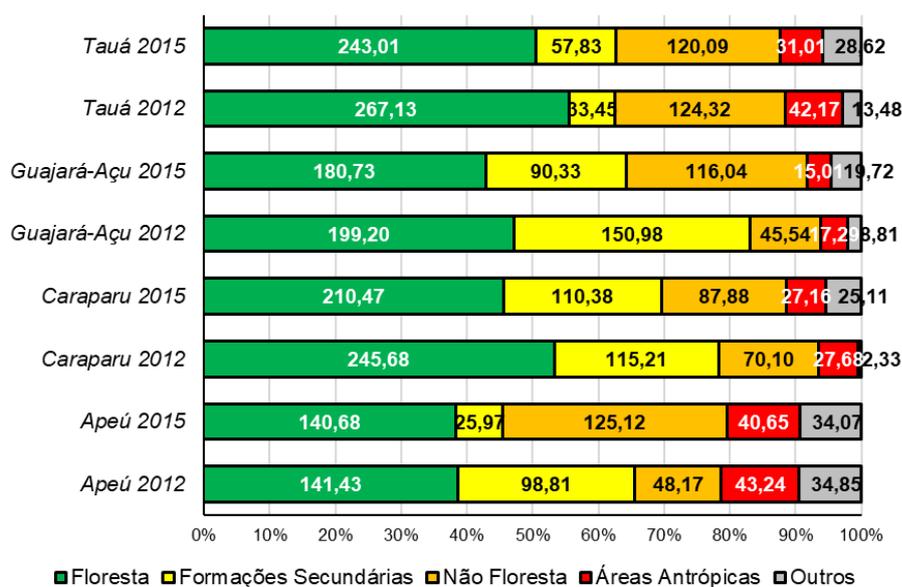
### 6.2.2 Uso e Cobertura da Terra nas Bacias Hidrográficas

Assim como ocorreu para o primeiro parâmetro de VRH, o segundo, as Mudanças de Uso e Cobertura da Terra ou LUCC, enfatizam as distinções entre os diferentes grupos de bacias, da mesma forma, como as variações entre as bacias de um mesmo grupo. Para as Meso-

bacias foi possível realizar a análise em dois anos, os quais apesar de próximos, com uma diferença de três anos, mostraram certas características compatíveis com os dados vistos na escala da MRMB.

Na Figura 24 é exposto o quantitativo das classes de LUCC para as mesobacias, destaca-se que nas quatro áreas há redução da classe Floresta de 2012 para 2015, chegando ao patamar de 35,21 km<sup>2</sup>, cerca de 7,64% da área total na bacia do rio Caraparu, 18,47 km<sup>2</sup> para Guajará-Açu, 24,12 km<sup>2</sup> para do rio Tauá e somente 0,75 km<sup>2</sup> para do Apeú.

Figura 24 - Uso e Cobertura da Terra nas Mesobacias, em km<sup>2</sup>.



Ainda sobre as mesobacias, pelas Figuras 25 e 26 identifica-se onde ocorreram as modificações na paisagem. De modo geral, os remanescentes florestais são representados pela vegetação ripária, ou seja, aquela sobre a região de influência dos cursos de águas naturais e sobre os quais exerce forte influência (ZAKIA *et al.*, 2009), neste, principalmente, para a diminuição de sua vulnerabilidade. Além disso, com a exceção da bacia do Tauá, houve diminuição das formações secundárias e aumento das áreas não florestais, sendo assim, mais áreas em processo de regeneração deram lugar a pastagens, o que ocorreu até mesmo com porções de solo exposto, representado pela classe de Áreas Antrópicas.

Outra questão que se identifica pelos mapas é que as maiores modificações da paisagem foram proporcionadas nas regiões das nascentes dos rios, o que tem impacto direto sobre a hidrodinâmica das bacias, bem como, sobre o ecossistema aquático, a disponibilidade hídrica e outros fatores.

Figura 25 - LUCC nas mesobacias do Apeú e Caraparu.

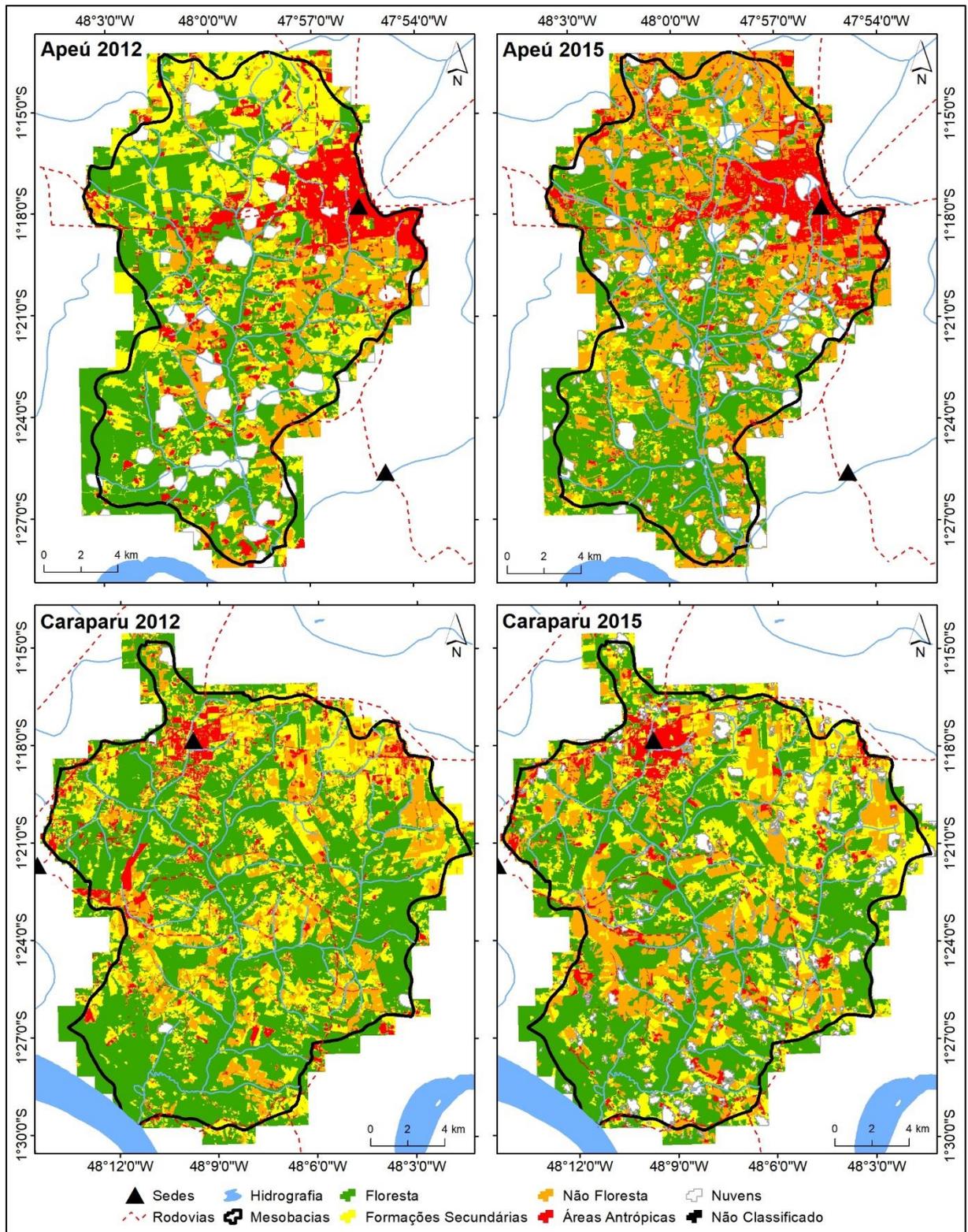
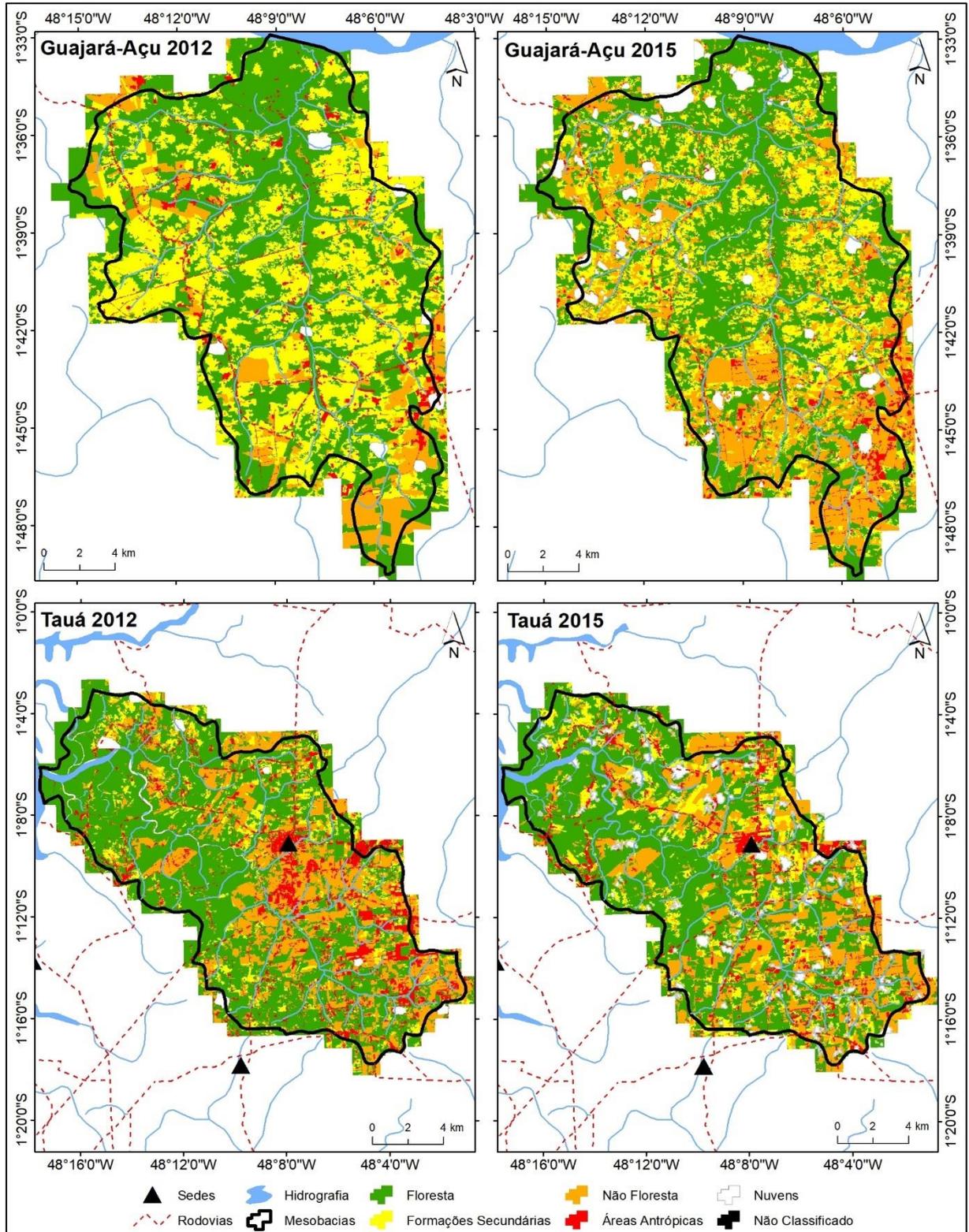
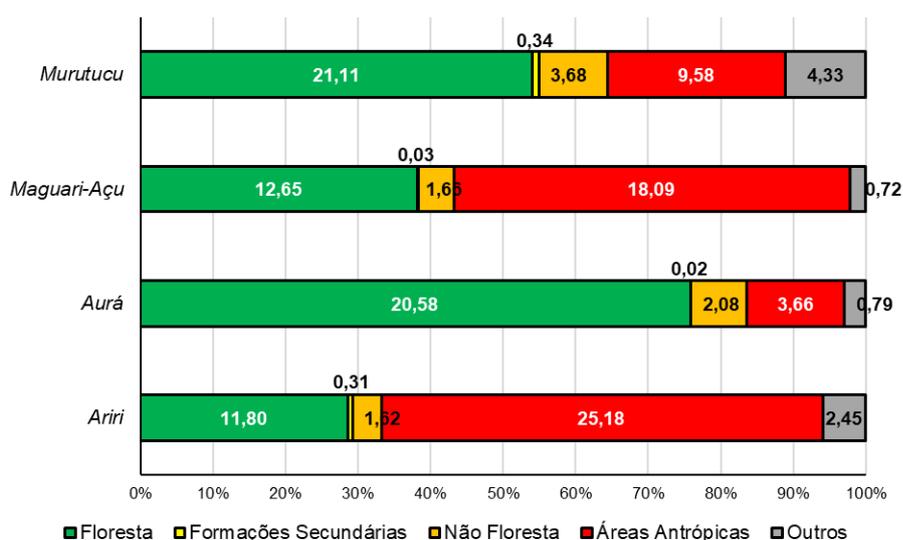


Figura 26 - LUCC nas mesobacias do Guajará-Açu e Tauá.



Nas microbacias hidrográficas houve o predomínio das classes de Floresta e Áreas Antrópicas (Figura 27). Entende-se que a intensa urbanização pela qual essas áreas foram submetidas que a maioria das áreas que seriam de Formações Secundárias ou Não Floresta, e até mesmo de Floresta, fossem substituídas por áreas de intervenção antrópica. As bacias dos rios Ariri e Maguari-Açu foram as que mais representaram esse processo, com 60,88% (25,18 km<sup>2</sup>) e 54,55% (18,09 km<sup>2</sup>), respectivamente, de seus territórios ocupados por Áreas Antrópicas, em sua maioria áreas urbanizadas. Quadro distinto do das bacias do Aurá e Murutucum, onde 75,84% (20,58 km<sup>2</sup>) e 54,09% (21,11 km<sup>2</sup>) de seu território ainda conserva áreas de Floresta.

Figura 27 - Uso e Cobertura da Terra nas Microbacias, em km<sup>2</sup>.



Assim como foi exposto sobre o parâmetro de Pressão Antrópica, observa-se que as microbacias do Ariri e Maguari-Açu sofreram mais com a intensificação das mudanças de uso da terra do que as bacias do Aurá e Ariri, devido ao histórico do processo de urbanização da grande Belém sobre as primeiras, assim como, pela presença de unidades de conservação nas secundárias, a Figura 28 contém elementos da paisagem na bacia do Ariri. A Figura 29 mostra a distribuição das classes de LUCC, onde pode ser visto o que foi dito anteriormente e também, semelhante às mesobacias, que as modificações foram mais intensas sobre as áreas mais afastadas dos exutórios. Uma possível explicação seriam que as regiões mais próximas da foz incluem terrenos de várzea e igapós, lugares mais difíceis de serem ocupados pela infraestrutura urbana sem grandes intervenções.

A degradação ambiental de microbacias caracteriza-se principalmente pela gradativa perda dos canais de primeira ordem (responsáveis pelo escoamento direto e recarga a partir de

aquíferos livres), dependência do abastecimento a partir da água das chuvas e comprometimento da qualidade das águas, onde a redução da vazão pode aumentar o seu tempo de concentração e assim possibilitar efeitos diversos, como por exemplo a eutrofização (CABRAL *et al.*, 2013; MAROTTA *et al.*, 2008; VARGAS *et al.*, 2018).

Figura 28 - Elementos de uso e cobertura da terra na região da bacia do Ariri.

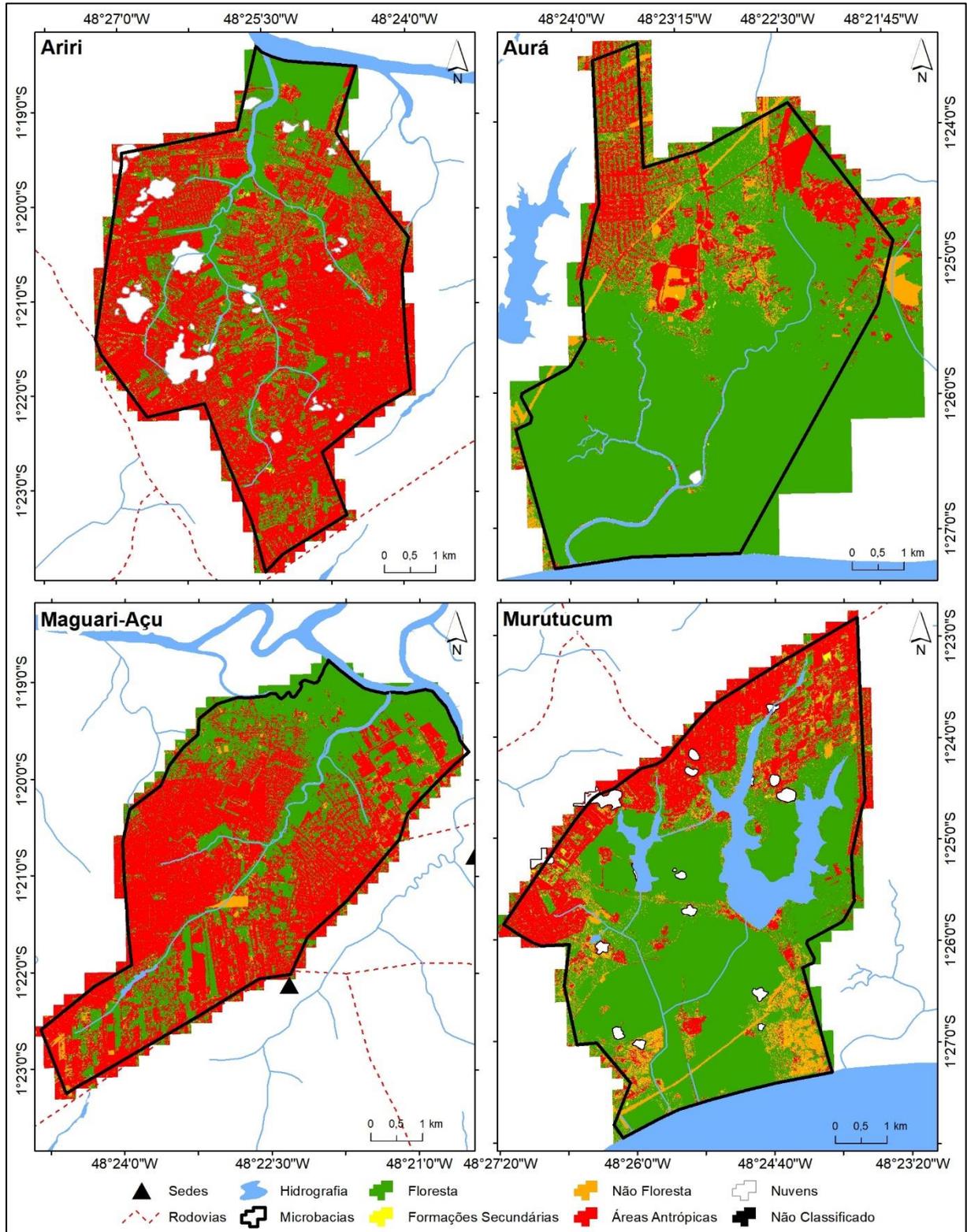


**A.** Imagem aérea mostrando a nascente de um dos cursos d'água da bacia do Ariri (12/2016), **B.** Vista aérea no extremo norte de Ananindeua, mostrando a região das ilhas (12/2016), **C.** Rio Ariri próximo a sua nascente (05/2016), **D.** Rio Ariri no cruzamento com a Av. Independência (05/2016).

A recuperação destes ambientes depende muito das condições de manejo da bacia, assim áreas potencialmente urbanas (Ex. Ariri e Maguari-Açu) tendem a ter baixa resiliência, se comparado ao ambiente das mesobacias (Figuras 25 e 26) onde a rede de drenagem mais densa e o maior grau de variação das formas de cobertura da terra, possibilitam uma maior resiliência. A capacidade adaptativa das bacias hidrográficas aos efeitos da urbanização e outros decorrentes do Lucc depende de vários fatores desde as características físicas locais, em especial a pluviosidade e recarga a partir da água subterrânea, ao histórico e cenário futuro de uso da terra, que

vão conduzir a velocidade e intensidade das alterações sofridas (BERTOLO *et al.*, 2010; GO-DOY; SOUSA, 2015; SOUZA; GASTALDINI, 2014).

Figura 29 - Distribuição das classes de LUCC para as microbacias.



Conclui-se então, que tanto para o primeiro parâmetro de vulnerabilidade abordado, a Pressão Antrópica, quanto para o segundo, o Uso e Cobertura da Terra, existe fatores que influenciam para mais ou para menos a predominância de certas classes. A esses fatores chama-se *drivers* de mudanças da paisagem, sobre isso trata a próxima seção.

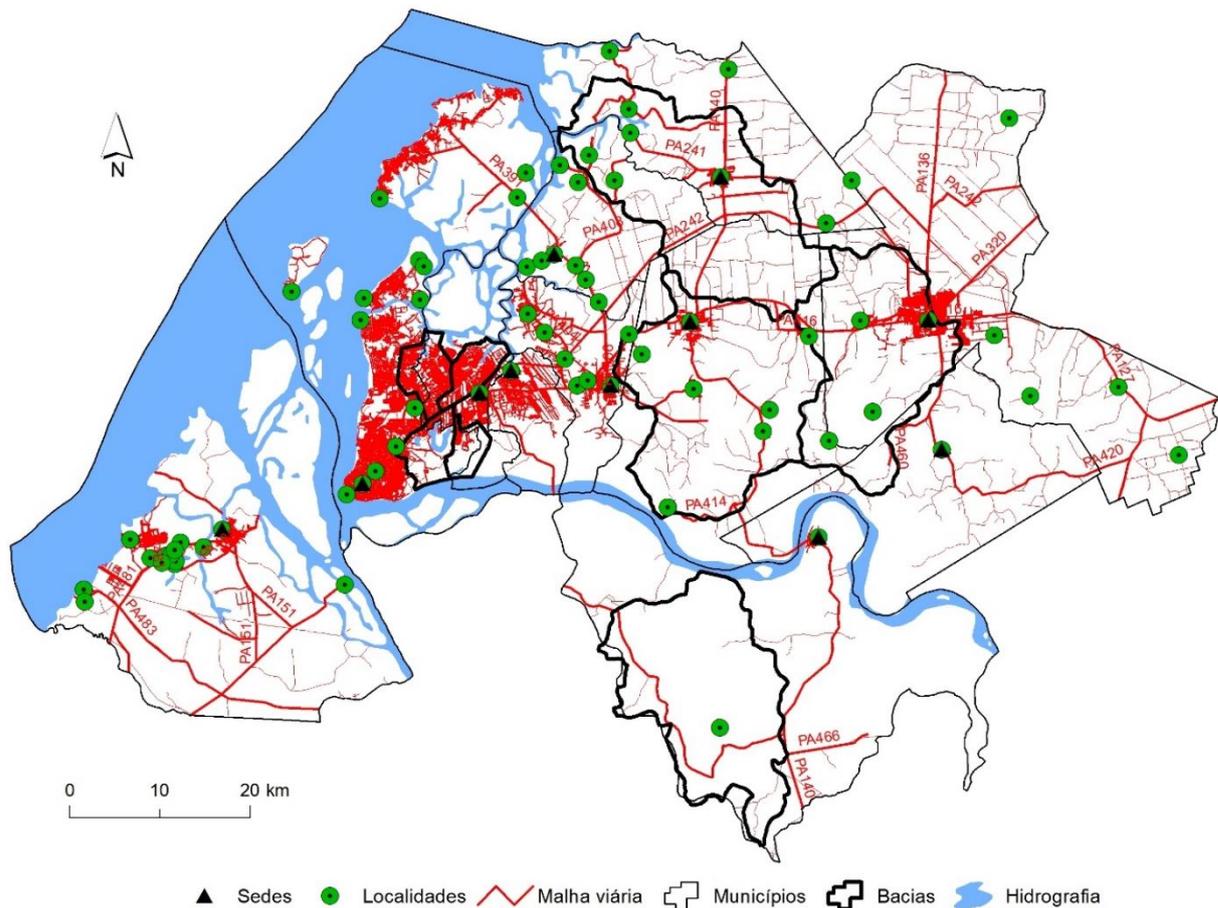
### 6.2.3 Identificação dos *Drivers* de Mudança da Paisagem

Esta seção destaca as principais causas/fatores de mudança da paisagem nas bacias e, por conseguinte na MRMB, que têm influência direta sobre o comportamento dos parâmetros de VRH. Na literatura especializada é comum esses fatores de modificação serem chamados de *drivers*, no termo em inglês (LAMBIN *et al.*, 2001).

Uma referência corriqueira no estudo das alterações dos ecossistemas é a presença de uma malha viária bem desenvolvida. Ao longo das grandes rodovias padrões de ocupação e desmatamento são observados através de imagens de satélite, fornecendo o panorama físico como consequência de um programa político para a região. É o que vem sendo observado na região Amazônica ao longo das últimas cinco décadas, onde a produção agrícola extensiva, a pecuária, a exploração madeireira e outros são apontados como os principais *drivers*.

Na área de estudo, o crescimento das cidades foi acompanhado pela expansão dos núcleos urbanos, influenciando o surgimento de comunidades interioranas menos populosas e uma malha viária as interligando. A Figura 30 mostra esses elementos distribuídos no território da MRMB; quando comparada com as figuras de Pressão Antrópica e LUCC nas bacias hidrográficas, principalmente nas mesobacias, percebe-se que esses elementos estão presentes nas áreas mais afetadas pelo adensamento populacional e/ou pelas modificações da cobertura da terra.

Figura 30 - Malha viária, localidades e sedes municipais da MRMB.



Outro fator influenciador dos parâmetros de vulnerabilidade, neste caso mais significativo para as microbacias, são as áreas chamadas pelo IBGE de aglomerados subnormais, definidas por ele como:

Conjunto constituído de, no mínimo, 51 ou mais unidades habitacionais (barracos, casas etc.) carentes, em sua maioria de serviços públicos essenciais, ocupando ou tendo ocupado, até período recente, terreno de propriedade alheia (pública ou particular) e estando dispostas, em geral, de forma desordenada e densa (IBGE, 2010c).

Segundo informações do Censo Demográfico de 2010, há na MRMB 189 aglomerados subnormais os quais correspondem a 162,57 km<sup>2</sup>, cerca de 2,36% da extensão territorial da mesorregião. Elas estão divididas da seguinte maneira, Ananindeua possui 62 dessas áreas que somam 49,94 km<sup>2</sup>; Barcarena 2 com 0,77 km<sup>2</sup>; em Belém são 101 com 85,67 km<sup>2</sup>; Benevides apresenta 2 com 0,21 km<sup>2</sup>; e Marituba 22, somando 25,98 km<sup>2</sup>.

Apesar da pequena representação desses espaços em comparação com a extensão total da área de estudo, pela Figura 31 observa-se que elas se concentram na região central de Belém e suas adjacências, principalmente em Ananindeua e Marituba, tendo interferência direta

sobre as microbacias hidrográficas, onde a Tabela 13 mostra o quanto dessas áreas é ocupado por aglomerados subnormais.

Figura 31 - Aglomerados subnormais na MRMB.

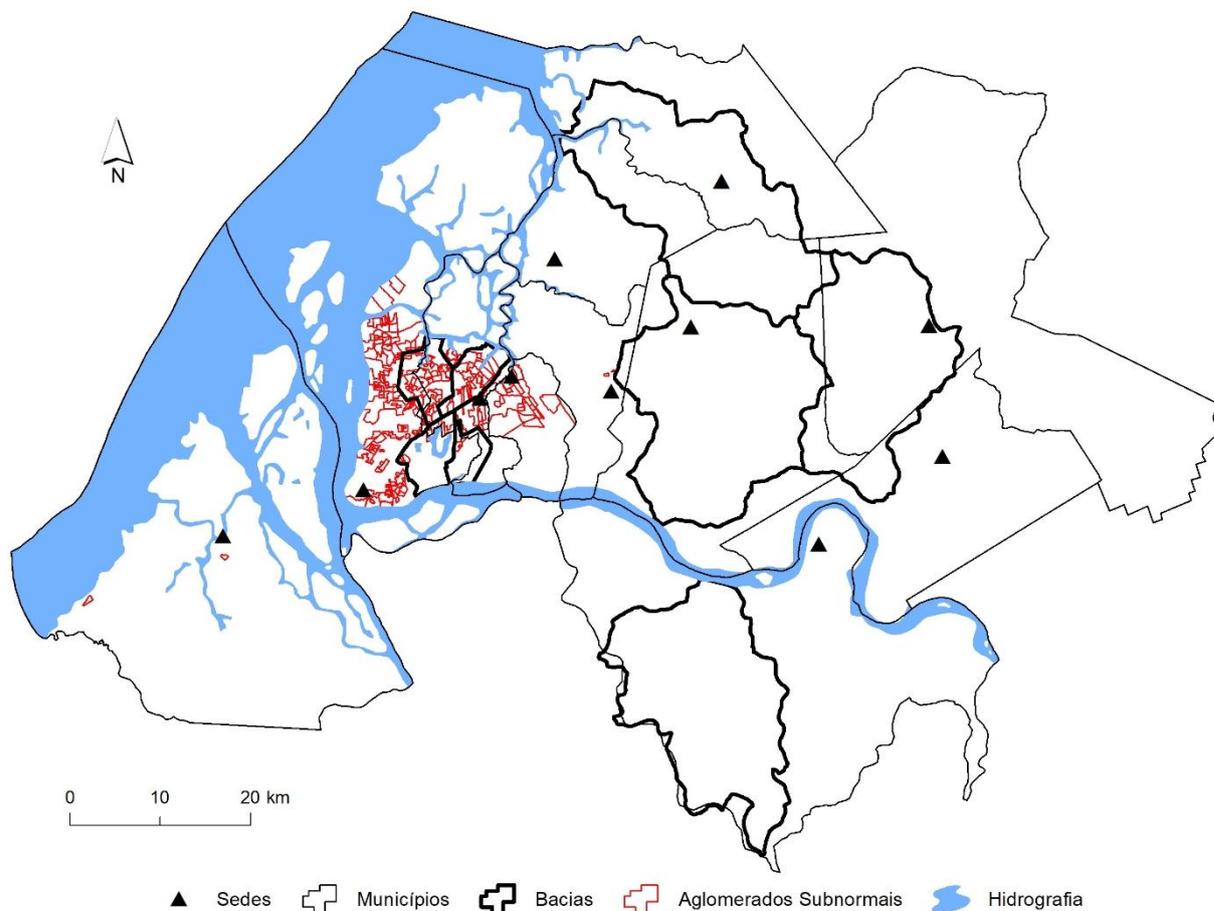


Tabela 13 - Área ocupada pelos aglomerados subnormais nas microbacias.

Microbacias	Aglomerados Subnormais		
	Quantidade	km <sup>2</sup>	%*
<i>Ariri</i>	47,00	22,32	60,17
<i>Aurá</i>	4,00	1,37	6,41
<i>Maguari-Açu</i>	29,00	17,75	60,55
<i>Murutucum</i>	7,00	2,83	8,16

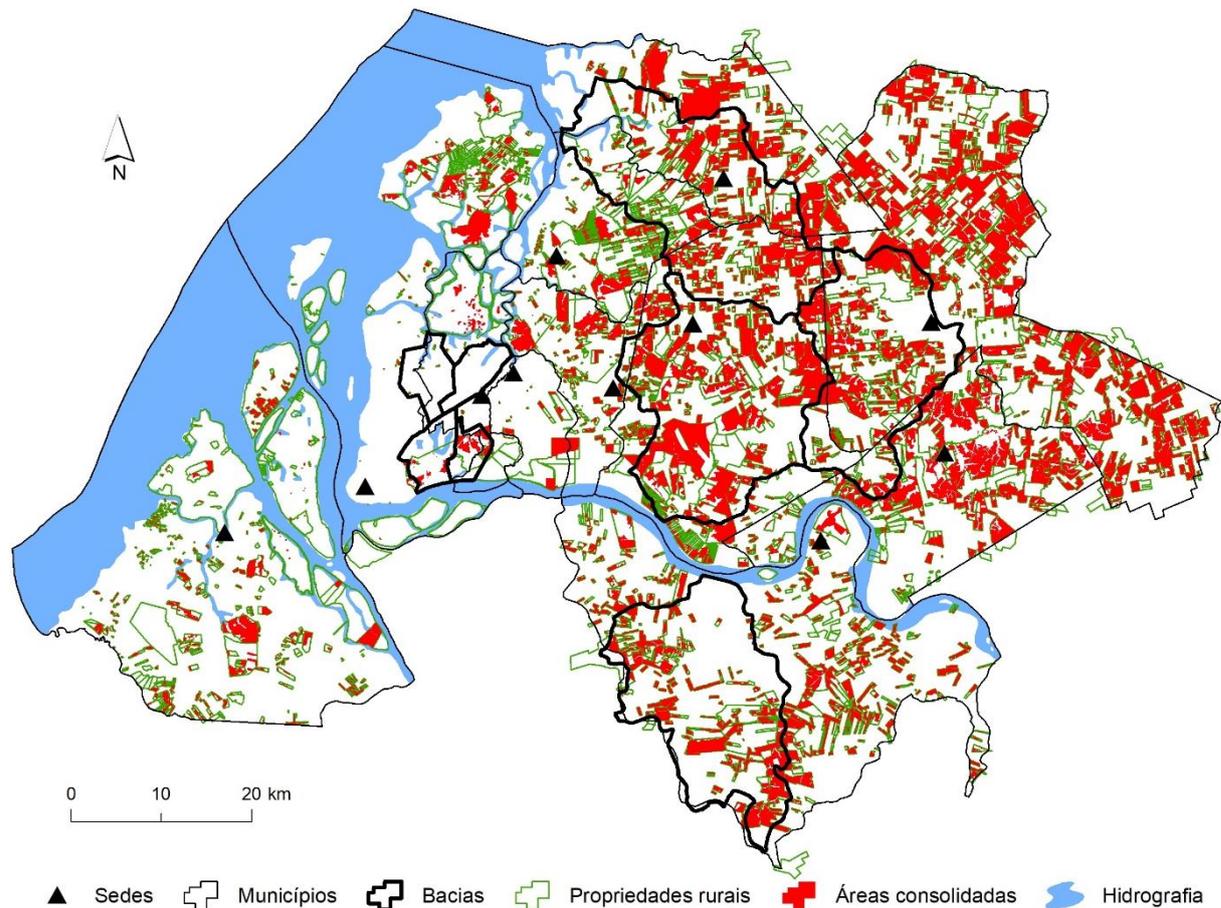
\* Porcentagem de área da microbacia ocupada por aglomerados subnormais.

Como pode ser visto, as bacias dos rios Ariri e Maguari-Açu, apresentam o maior número de aglomerados em quantidade e área, chegando a ter mais de 60% de seus territórios ocupados por essas áreas. Assim, como é de se esperar, essas bacias sofreram as mais significativas mudanças das classes de cobertura para as de uso da terra, portanto, é um fator importante de ser levado em consideração no estudo da vulnerabilidade, não só dos recursos hídricos.

Um terceiro fator que se julgou relevante de mencionar foi a presença de propriedades rurais na MRMB. De acordo com dados consolidados do Cadastro Ambiental Rural (CAR), até 18/11/2018, 3.763 propriedades rurais tinham seu território, total ou parcialmente, inseridos nos municípios da mesoregião, ocupando 2.949,56 km<sup>2</sup>, cerca de 42,74% da área de estudo. Ainda, nos imóveis há áreas de ocupação antrópica, chamadas de áreas consolidadas, onde há “edificações, benfeitorias ou atividades agrossilvipastoris” (BRASIL, 2012).

As áreas consolidadas somam 1.196,71 km<sup>2</sup> na MRMB, correspondente a 17,34% desse território. A Figura 32 mostra a distribuição dessas áreas, onde é evidente a maior influência sobre as mesobacias.

Figura 32 - Área consolidada das propriedades rurais.



Ao verificar a presença dessas áreas nas bacias, constata-se que elas exercem maior influência sobre a paisagem da mesobacias, como afirmado no início desta seção. Quantitativamente a mesobacia do rio Caraparu possui o máximo de propriedades rurais com áreas consolidadas demarcadas, no total de 362, que correspondem a 152,87 km<sup>2</sup> desta bacia, assim como

33,56% dessa. Pela Tabela 14, como exceção tem-se a microbacia do Aurá, onde até 24,59% de sua área é ocupada por áreas consolidadas.

Tabela 14 - Áreas consolidadas nas bacias.

Bacias	Áreas consolidadas		
	Quantidade	km <sup>2</sup>	%*
<i>Apeú</i>	248	98,16	30,41
<i>Caraparu</i>	362	152,87	33,56
<i>Guajará-Açu</i>	199	76,19	24,21
<i>Tauá</i>	343	110,69	18,88
<i>Ariri</i>	7	0,10	0,27
<i>Aurá</i>	9	5,27	24,59
<i>Maguari-Açu</i>	0	0,00	0,00
<i>Murutucum</i>	2	2,54	7,31

\* Porcentagem de área da microbacia ocupada por aglomerados subnormais.

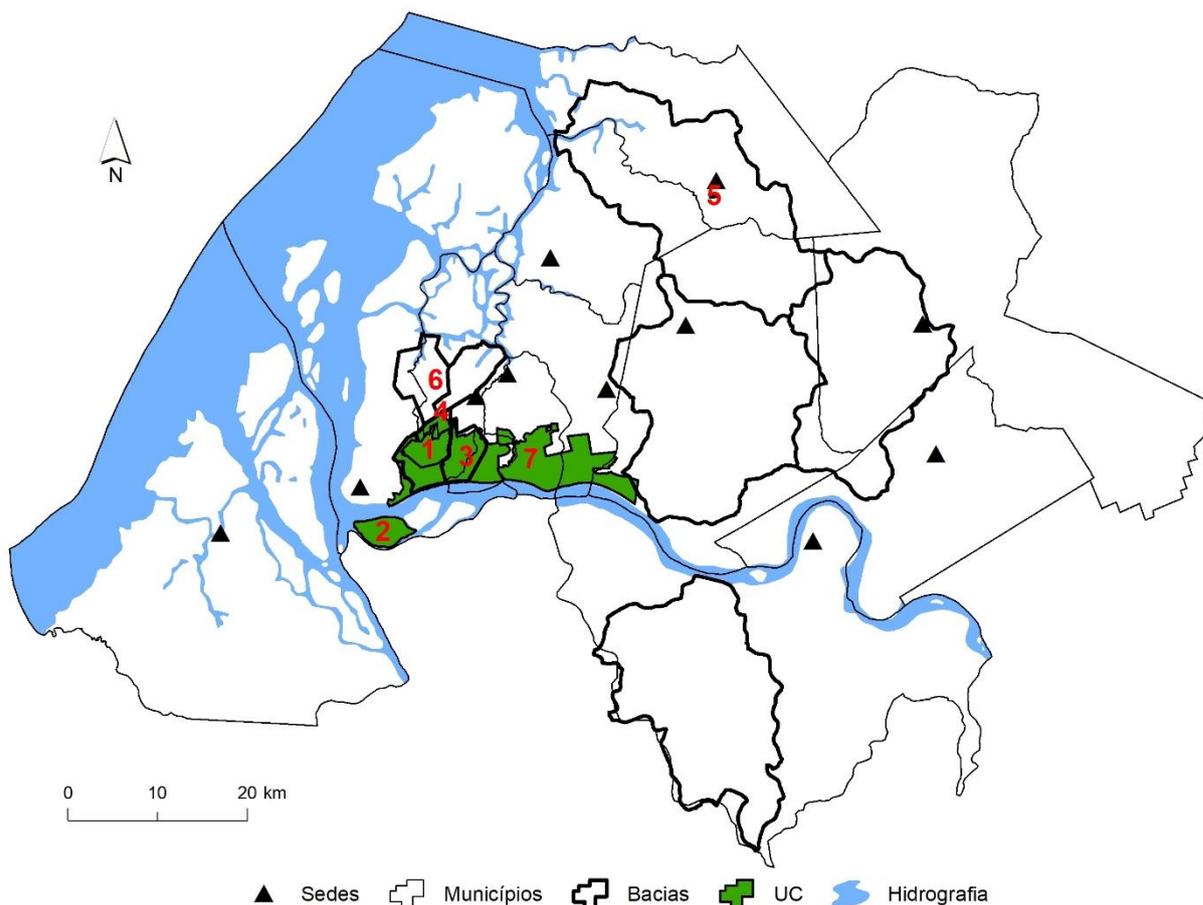
Há também a presença de unidades de conservação (UC) na área de estudo (Tabela 15). Com um total de sete unidades constantes na base do MMA, as quais somam a área total de 149,64 km<sup>2</sup>, sendo duas municipais, quatro estaduais e uma federal.

Tabela 15 - Lista de unidades de conservação presentes na MRMB.

Nº	UC	Área (km <sup>2</sup> )	Ano de criação
1	Parque Estadual do Utinga	13,99	1993
2	Área de Proteção Ambiental da Ilha do Combu	15,04	1997
3	Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém	56,54	1993
4	ARIE Parque Ambiental Antônio Danúbio Lourenço da Silva	0,04	2011
5	Reserva Particular do Patrimônio Natural Klagesi	0,23	2005
6	Área de Relevante Interesse Ecológico Museu Parque Seringal	0,01	2012
7	Refúgio de Vida Silvestre Metrópole da Amazônia	63,79	2010

As unidades mais extensas territorialmente estão localizadas as margens do rio Guamá, tendo efeito direto sobre o comportamento da paisagem da microbacias, sobre as dos rios Aurá e Murutucum. Pelo mapa da Figura 33 temos que as UC 1 e 3 ocupam quase toda a extensão dessas duas bacias, de modo que, podemos concluir, que as classes de uso da terra também exercem pressão sobre as faixas marginais dessas áreas de proteção, a partir do crescimento urbano ao longo do eixo viário da BR-316.

Figura 33 - Unidades de conservação na MRMB.



A numeração das UC segue a Tabela 15.

Como será visto, os parâmetros de Pressão Antrópica e LUCC, aliados aos fatores de mudanças apresentados nessa seção, explicam o comportamento espaço-temporal da VRH.

### 6.3 Estudo da Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos

Os resultados mostram que a VRH nas mesobacias variou mais significativamente entre os graus baixo e médio, enquanto nas microbacias apresentou comportamento diverso entre as quatro categorias, muito em função da influência dos *drivers* de mudança da paisagem comentados na última seção.

Identifica-se a diminuição do grau baixo e aumento do grau médio de vulnerabilidade nas quatro mesobacias de 2012 para 2015; padrão semelhante ao das classes de LUCC, porém, mais acentuado em algumas unidades de estudo, visto que nas mesobacias grandes áreas foram ocupadas pela Faixa 0 de Pressão Antrópica, o que reduz a vulnerabilidade nesses pontos. A

Figura 34 mostra a disposição espacial dos graus de vulnerabilidade nas mesobacias dos rios Apeú e Caraparu e a Figura 35 nas mesobacias dos rios Guajará-Açu e Tauá.

Figura 34 - VRH nas mesobacias dos rios Apeú e Caraparu.

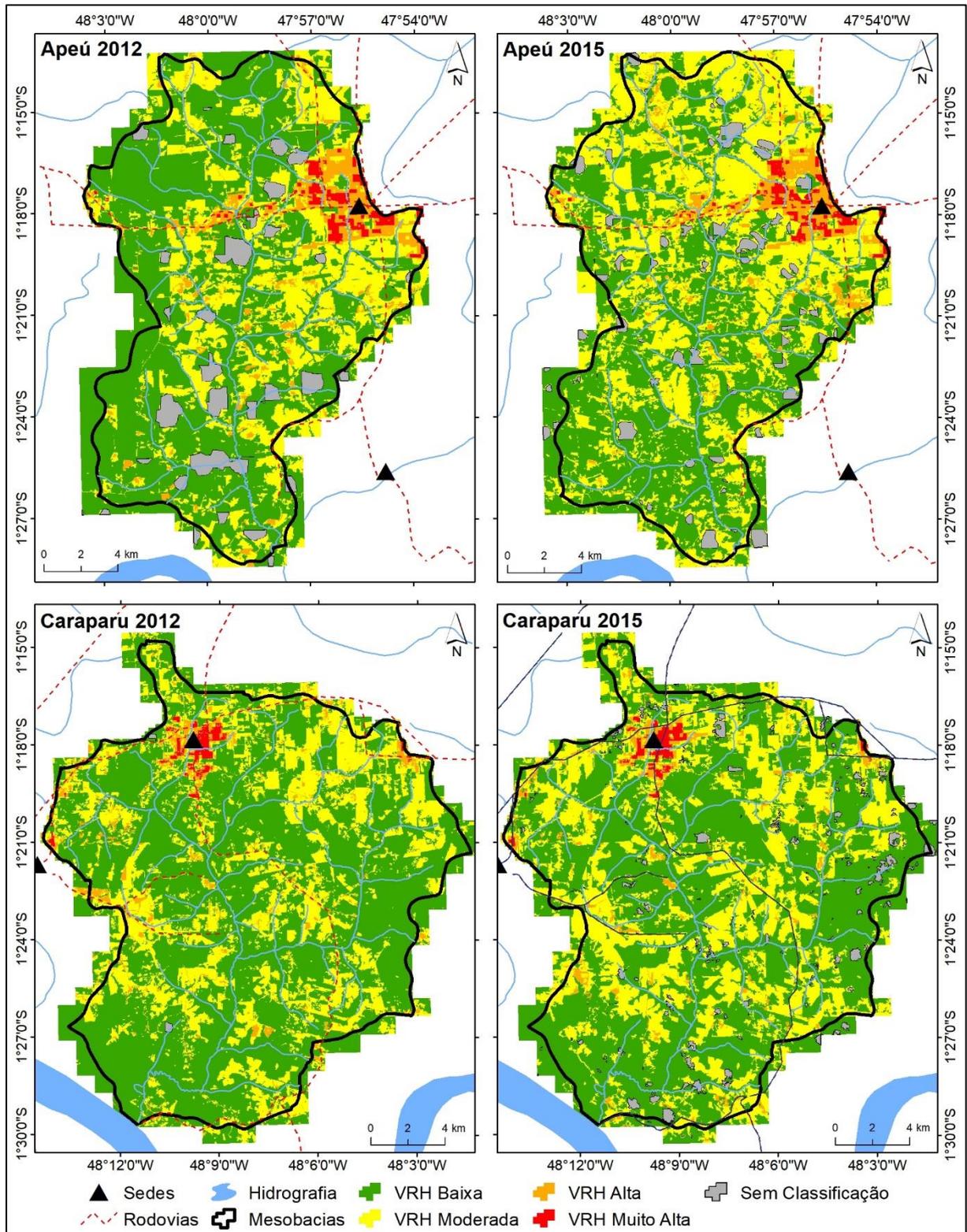
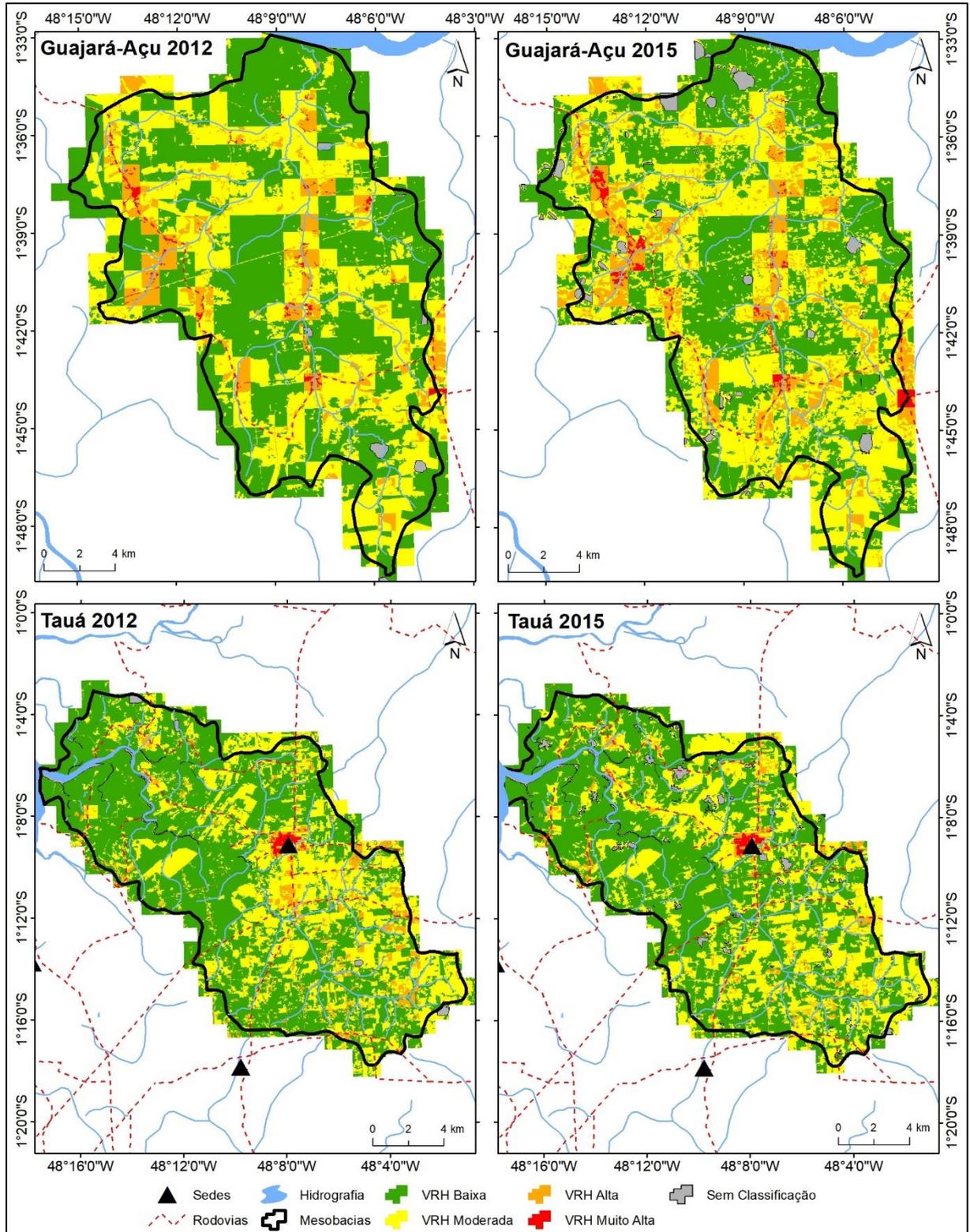


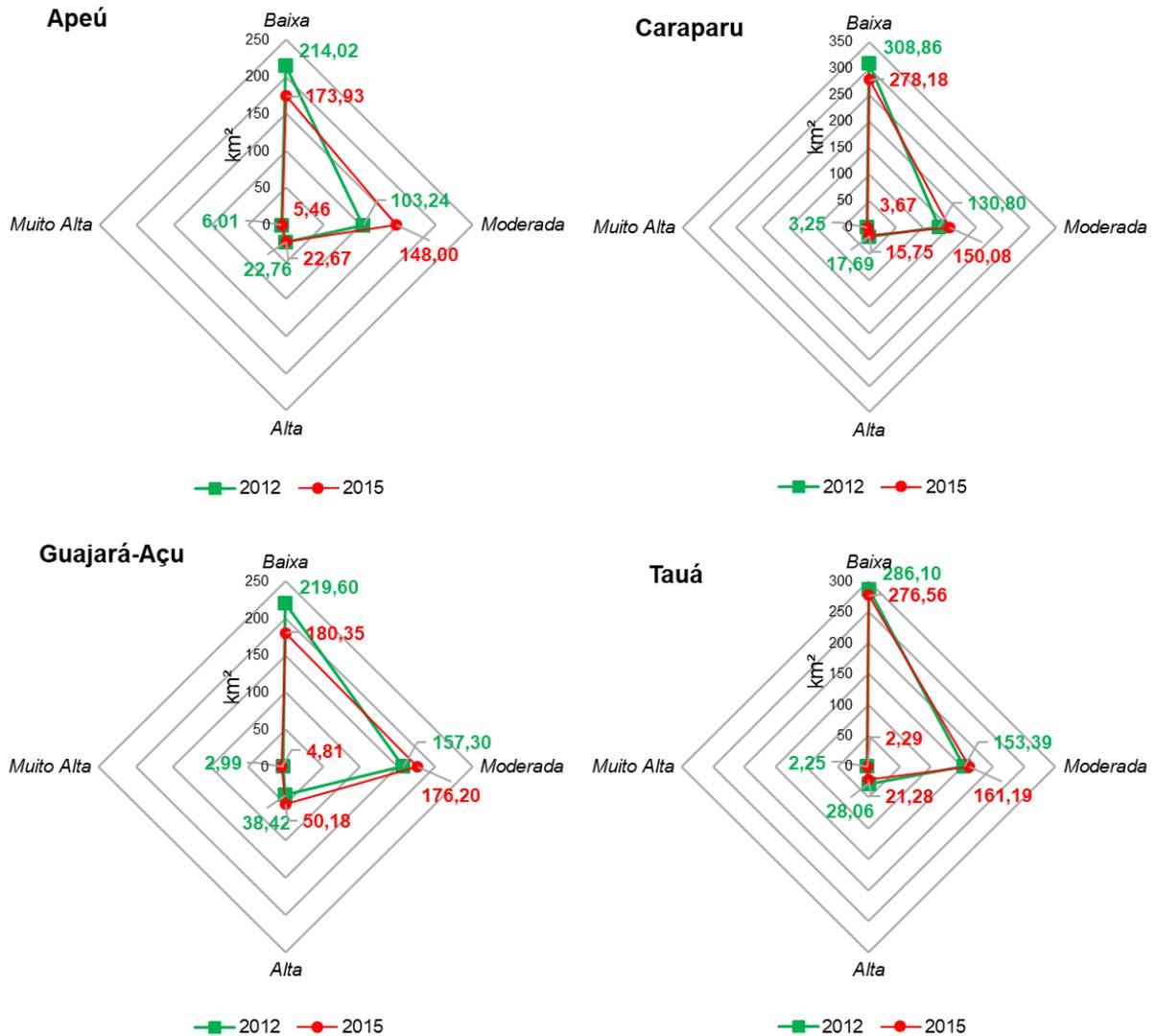
Figura 35 - VRH nas mesobacias dos rios Guajará-Açu e Tauá.



A Figura 36 evidência como ocorreu a variação nos períodos considerados, para cada uma das áreas. As maiores alterações foram percebidas na bacia do Apeú, onde houve redução do grau baixo de VRH da ordem de 40,09 km<sup>2</sup>, representando 10,94%, enquanto que a classe

de grau moderado aumentou em 44,76 km<sup>2</sup> ou, em termos percentuais, 12,21%. Modificações nas classes de LUCC nas porções norte e noroeste dessa mesobacia são as principais causadoras dessa oscilação, onde a principal mudança foi da classe de Formações Secundárias para de Não Floresta.

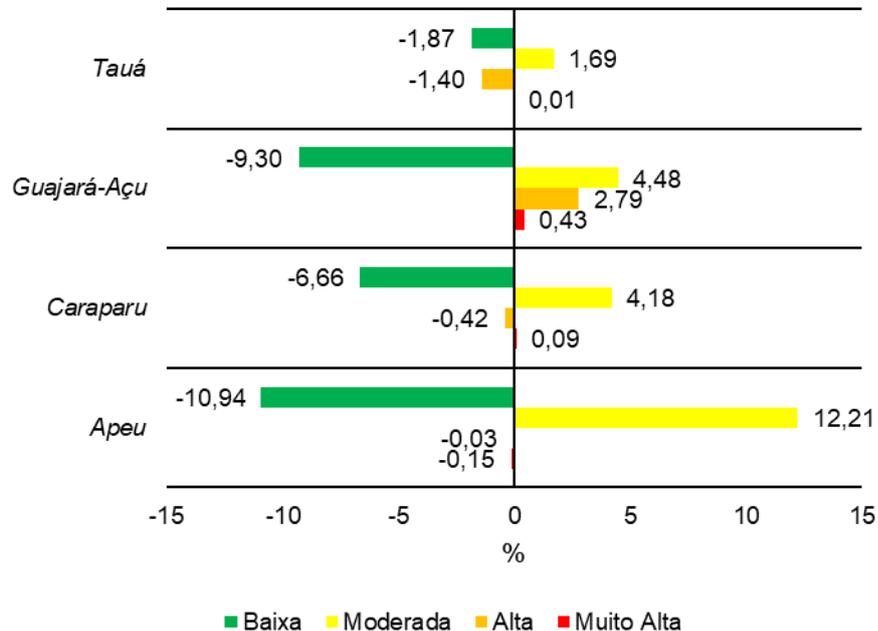
Figura 36 - Quantitativo dos graus de vulnerabilidade nas mesobacias.



A Figura 37 mostra as demais variações percentuais, mas esse mesmo padrão é mantido, pois, como foi evidenciado está ocorrendo ao longo dos anos a substituição das classes de cobertura pelas de uso da terra. Apesar da menor variação dos graus Alto e Muito Alto de vulnerabilidade, a partir deles é possível perceber os pontos mais críticos para os recursos hídricos nas bacias. Por exemplo, a Guajará-Açu essas duas classes aumentaram, indicando que espaços outrora ocupados pelo grau Baixo em 2012 deram lugar aos outros em 2015, com 0,43% para

a VRH Muito Alta; pelo mapa de VRH dessa bacia vê-se que os maiores incrementos de desse grau de vulnerabilidade ocorreu ao longo da rodovia PA-140 Perna Leste.

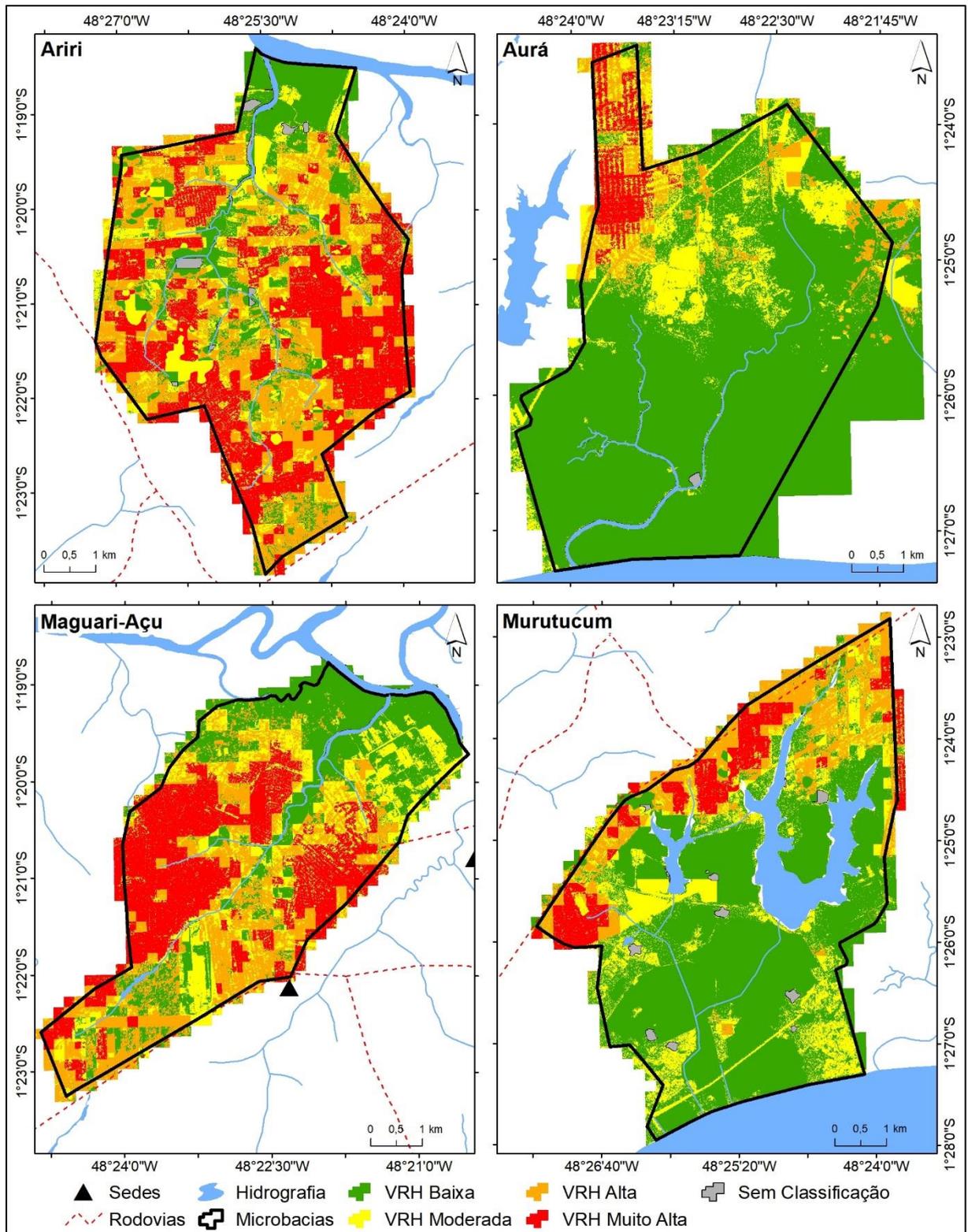
Figura 37 - Variação percentual dos graus de VRH nas mesobacias de 2012 para 2015.



As microbacias hidrográficas devido as alterações de cobertura da terra, a alta pressão antrópica e a influência de diferentes *drivers* de mudança, apresentaram comportamentos diversos. Pela Figura 38 e pelos gráficos da Figura 39, observa-se dois grupos de microbacias quanto aos graus de vulnerabilidade. As microbacias do Aurá e Murutucum têm a maior parte de sua área coberta pela classe VRH Baixa, 19,64 km<sup>2</sup> (72,63%) e 19,65 km<sup>2</sup> (51,60%), respectivamente; enquanto que as microbacias do Ariri e Maguari-Açu têm a maior parte de seu território coberto pela VRH Muito Alta, com 12,68 km<sup>2</sup> (31,12%) para a primeira e 9,22 km<sup>2</sup> (28,10%) para a segunda.

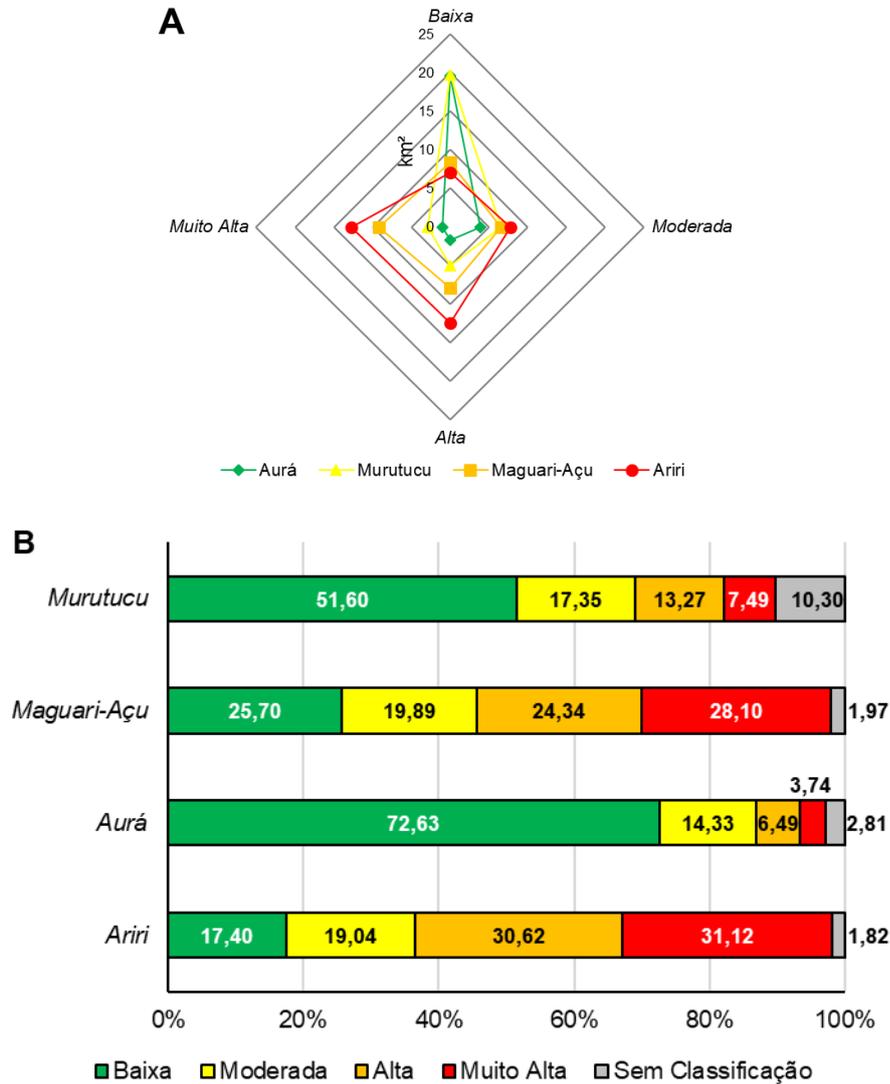
Constatasse que devido à alta concentração populacional apresentada pelas áreas centrais de Belém e Ananindeua, o parâmetro Pressão Antrópica exerce maior influência sobre a variação espacial da VRH, em relação àquela analisada nas mesobacias, contudo, também se observa que essa influência é maior nas bacias de maior vulnerabilidade. Isso fica claro quando se analisa que as bacias de menor vulnerabilidade, Aurá e Murutucum, apresentam correspondência entre as classes de LUCC e de VRH, enquanto que nas de maior VRH essa correspondência não é tão direta, sendo conjuntamente explicada pelo parâmetro de Pressão Antrópica.

Figura 38 - Vulnerabilidade dos recursos hídricos nas microbacias.



Por exemplo, vê-se que nas microbacias do Ariri e do Maguari-Açu as classes de cobertura da terra, Floresta e Formações Secundárias, somam, nesta ordem, 29,28% e 38,26% de suas áreas, no entanto, nessas mesmas bacias, as classes de VRH Alta e Muito Alta alcançam os percentuais de 36,44% e 45,59%.

Figura 39 - Quantitativo da vulnerabilidade dos recursos hídricos nas microbacias.



Variação da VRH por microbacia em **A.** km<sup>2</sup> e **B.** em percentual.

De modo semelhante ao visto nas mesobacias, as regiões de maior vulnerabilidade nas microbacias foram aquelas mais próximas das nascentes, enquanto que os pontos localizados na vizinhança dos exutórios apresentam os menores índices. Há, em grande parte, influência da malha viária, pois, as quatro bacias estão na zona de influência da BR-316, eixo de expansão urbana da capital paraense nas últimas décadas.

Malta *et al.* (2017) argumentam que a vulnerabilidade pode ser entendida em diferentes contextos disciplinares, relacionados a sustentabilidade, riscos naturais e ambientais, mudanças climáticas, na área social, econômicas e de saúde. Assim, a análise da vulnerabilidade em bacias hidrográficas pode ser avaliada no contexto do LUCC como a resposta hidrológica observada em função do ciclo de alteração/recuperação sofridos. O caracterizado em vários exemplos (ROCHA; FERNANDES, 2014; SANTOS; MARTINS, 2018; VALLE JR *et al.*, 2013; VARGAS *et al.*, 2018; ZANELLA *et al.*, 2013) é que a resiliência destes ambientes tende a reduzir com a permanência e intensificação do efeito da alteração, por isto a análise temporal nas micro e mesobacias não teve a tendência progressiva da recuperação, pois como indicou na análise de drives, a tendência é de manutenção e ampliação dos efeitos e não de estagnação ou recuperação da cobertura florestal.

Nas análises complementares ficará mais evidente o impacto das mudanças de uso da terra e densidade populacional sobre os recursos hídricos, através da fragmentação da paisagem e das intervenções nas APP.

## **6.4 Análises Complementares**

Este capítulo apresenta as Análises Complementares que, de acordo com a metodologia proposta, inclui o estudo da estrutura da paisagem através de métricas e as áreas de conflitos de uso da terra nas APP, pelos dados de LUCC.

### **6.4.1 Estrutura da paisagem**

Conforme as métricas de paisagem propostas, a Tabela 16 mostra os resultados obtidos para as mesobacias hidrográficas, por classes de LUCC. Quando ao NP, constata-se aumento no número dos mesmos de 2012 para 2015, indicando aumento da fragmentação da paisagem, com exceção da bacia do Tauá onde houve redução em todas as classes. Pelo mapa de uso e cobertura da referida área, observa-se que grande parte da classe Floresta se distribui de forma contínua, especialmente na sua porção oeste. De modo geral, as demais classes são muito mais fragmentadas que essa, atingindo o máximo de 1.104 fragmentos na classe Não Floresta da bacia do rio Guajará-Açu em 2015.

Em contrapartida, a classe Floresta apresentou valores muito superiores de LPI em relação as demais, sendo que, somente para a bacia do Apeú este índice foi crescente de 2012 a 2015, diminuindo para as outras áreas. Esse índice é dado em porcentagem, no início do período de análise Caraparu apresentava o maior montante com 50,98% e no fim é Tauá com 39,81%; em termos de variação as mais significativas foram apresentadas pela mesobacia do Caraparu, com redução de 19,37%, e Guajará-Açu, com aumento de 7,69%.

Tabela 16 - Métricas de paisagem para as mesobacias.

<b>Classes/Ano</b>	<b>2012</b>	<b>2015</b>	<b>2012</b>	<b>2015</b>	<b>2012</b>	<b>2015</b>	<b>2012</b>	<b>2015</b>
<b>NP</b>	<b>Apeú</b>		<b>Caraparu</b>		<b>Guajará-Açu</b>		<b>Tauá</b>	
<i>Floresta</i>	162	368	203	215	216	361	169	139
<i>Formações Secundárias</i>	625	639	850	631	281	922	528	470
<i>Não Floresta</i>	492	877	935	523	334	1.014	642	534
<i>Áreas Antrópicas</i>	483	754	699	436	680	777	642	539
<b>LPI (%)</b>	<b>Apeú</b>		<b>Caraparu</b>		<b>Guajará-Açu</b>		<b>Tauá</b>	
<i>Floresta</i>	15,75	24,08	50,98	31,62	33,49	26,70	49,37	39,81
<i>Formações Secundárias</i>	8,43	0,31	2,86	2,58	6,32	2,08	0,33	0,56
<i>Não Floresta</i>	1,36	6,00	1,16	2,56	2,27	9,96	4,28	4,10
<i>Áreas Antrópicas</i>	5,82	5,14	0,98	1,53	0,22	0,24	1,23	0,56
<b>LSI</b>	<b>Apeú</b>		<b>Caraparu</b>		<b>Guajará-Açu</b>		<b>Tauá</b>	
<i>Floresta</i>	26,36	31,84	26,57	27,34	27,82	34,86	27,99	26,04
<i>Formações Secundárias</i>	33,92	33,13	43,41	38,85	33,50	47,20	28,33	29,83
<i>Não Floresta</i>	28,10	42,83	38,05	30,80	19,69	42,29	35,40	30,02
<i>Áreas Antrópicas</i>	23,76	28,82	29,11	24,54	28,77	29,94	28,85	26,76

Por tanto, a indicação de LPI vem a ratificar o que mostrou NP, pois, além de menor fragmentação a Floresta têm uma parte significativa ocupada por uma área contínua. No entanto, apesar de menor que as demais classes, o crescimento de NP entre os dois períodos é evidente na maioria das bacias, assim como, a diminuição de LPI, sendo dessa forma um indicador de alteração mais explícita da paisagem, já que, mostra uma fragmentação da macha da maior mancha, como mostrado por (PEREIRA *et al.*, 2001).

E, LSI por indicar a irregularidade das manchas é importante para complementar o entendimento do cenário apresentado pelas métricas anteriores. Essa, na grande maioria dos casos as classes de Formações Secundárias e Não Floresta apresentaram os maiores índices. Somente para a mesobacia do rio Guajará-Açu LSI foi crescente em todas as classes.

Para as microbacias (Tabela 17), observa-se que a microbacia do Ariri tem a quantidade mais elevada de fragmentos de Floresta, bem como, a maior parte de seu território é ocupado por mancha de Áreas Antrópicas e ainda há mais irregularidade em seus fragmentos.

Tabela 17 - Métricas de paisagem para as microbacias.

Classes	Microbacias			
	Ariri	Aurá	Maguari-Açu	Murutucum
<b>NP</b>				
<i>Floresta</i>	1.719	299	708	635
<i>Formações Secundárias</i>	356	49	26	317
<i>Não Floresta</i>	1.645	1.100	917	1.252
<i>Áreas Antrópicas</i>	254	468	228	492
<b>LPI (%)</b>				
<i>Floresta</i>	5,70	69,49	23,43	41,51
<i>Formações Secundárias</i>	0,03	0,01	0,01	0,04
<i>Não Floresta</i>	0,04	0,77	0,36	1,49
<i>Áreas Antrópicas</i>	59,90	3,23	52,47	21,38
<b>LSI</b>				
<i>Floresta</i>	49,86	18,66	32,42	24,78
<i>Formações Secundárias</i>	19,32	6,80	4,91	18,26
<i>Não Floresta</i>	44,09	38,10	32,38	43,56
<i>Áreas Antrópicas</i>	38,39	30,63	28,84	27,58

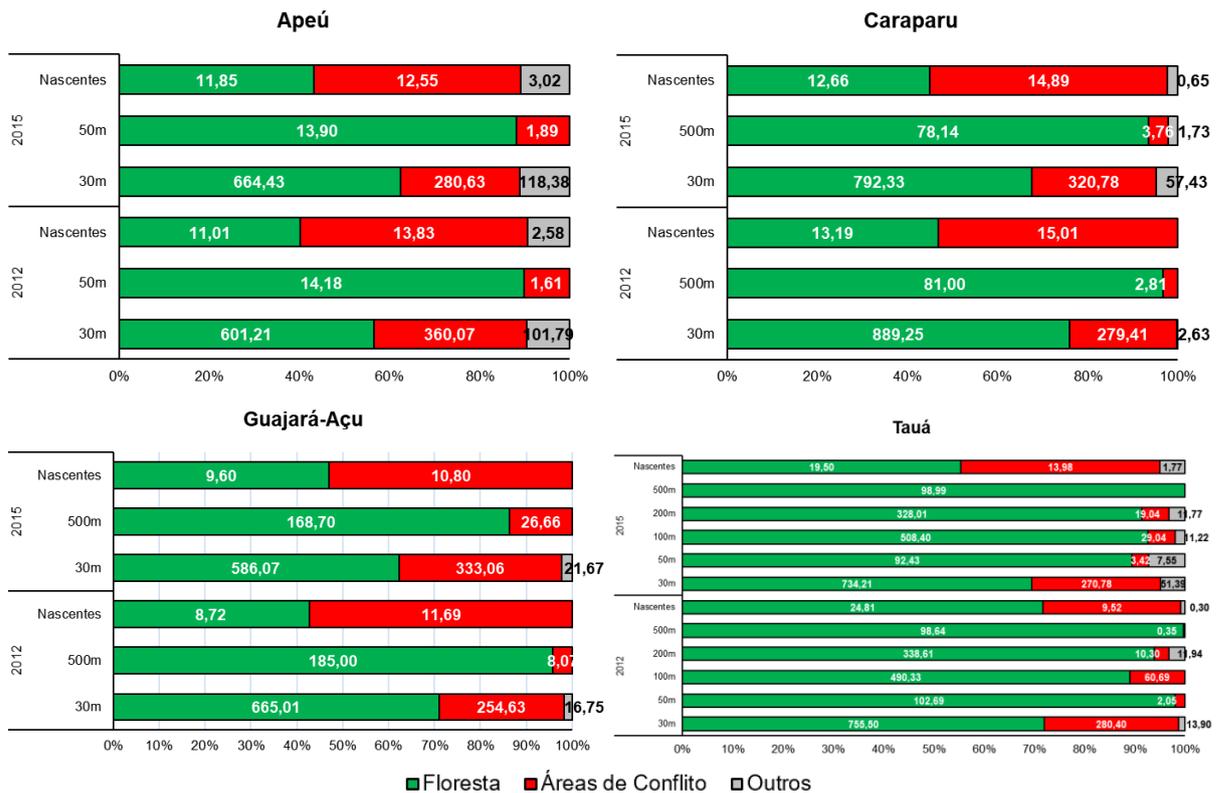
Além disso, destaca-se que a bacia do Aurá e do Murutucum apresentam predominância da mancha Floresta, como aponta o LPI, porém, o número de fragmentos da classe de uso da terra do tipo Não Floresta é alto em ambas, associando regiões que podem se desenvolver a manchas maiores no futuro.

De certo, constata-se que as mudanças de uso e cobertura vieram a acarretar consideráveis alterações sobre a paisagem das bacias, de forma a corroborar a tendência de impacto crescente sobre as classes de cobertura em favorecimento as de uso da terra. Assim, os próprios resultados quantitativos das classes de LUCC e do percentual que estas ocupam na unidade de análise, também são métricas que devem ser levadas em consideração no estudo dessa paisagem e de sua contribuição a VRH.

#### 6.4.2 Conflitos de ocupação em APP

A partir dos limites definidos pelo Código Florestal Brasileiro, sintetizados na Tabela 10, foram estabelecidas as faixas que delimitam as APP de cada bacia hidrográfica. Por sua vez, para determinar as áreas de conflitos de ocupação nas APP, quantificou-se as classes de LUCC dentro desses limites, considerando como áreas de conflitos as classes diferentes da de Floresta, portanto, somou-se os valores de Formações Secundárias, Não Floresta e Áreas Antrópicas.

Figura 40 - Áreas de conflito de uso da terra nas APP das mesobacias, em hectares.

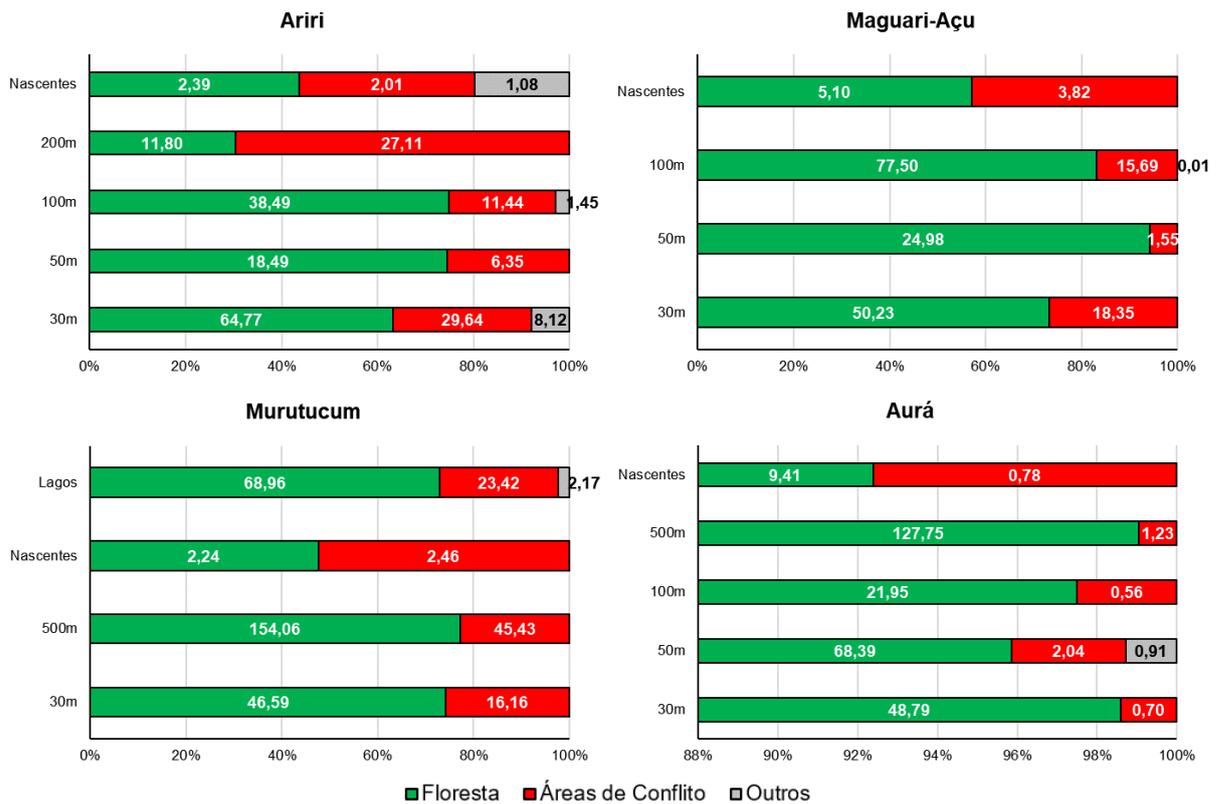


Observou-se que as APP de menor limite, como as de 30 m, são as mais afetadas pelas alterações da paisagem natural, bem como aquelas que definem as nascentes, como limite mínimo de 50 m. E, por outro lado, as APP de maior dimensão têm a maioria de sua área ainda preservada pela vegetação florestal remanescente, esses dados podem ser vistos na Figura 40.

Levando em consideração as análises anteriores sobre os parâmetros de vulnerabilidade, conclui-se que as áreas de preservação dos cursos d'água maiores estão mais afastadas das localidades de maior concentração populacional, assim como, dos pontos mais críticos de substituição das classes de cobertura pelas de uso da terra. Em oposição, os rios menores e suas nascentes sofrem mais a influência dos centros urbanos, da malha viária e de outros *drivers* de mudanças da paisagem.

Nas microbacias esse padrão se mantém com alguma alteração, Figura 41. Nesse caso, a intervenção antrópica é percentualmente mais acentuada nas nascentes, para todas as bacias, mas também apresentou variações significativas para as demais faixas, principalmente, para as de menor dimensão, da mesma forma como as mesobacias.

Figura 41 - Áreas de conflito de uso da terra nas APP das microbacias, em hectares.



Também, foi quantificada situação das APP em relação aos graus de vulnerabilidade. Nas mesobacias houve o predomínio dos graus baixo e moderado de VRH. O padrão identificado anteriormente se manteve, de modo que as faixas de nascentes e as de menor dimensão, como as de 30 m, foram as mais afetadas. Ainda, de modo geral, não se observou uma grande variação entre os anos de 2012 e 2015, conforme Tabela 18.

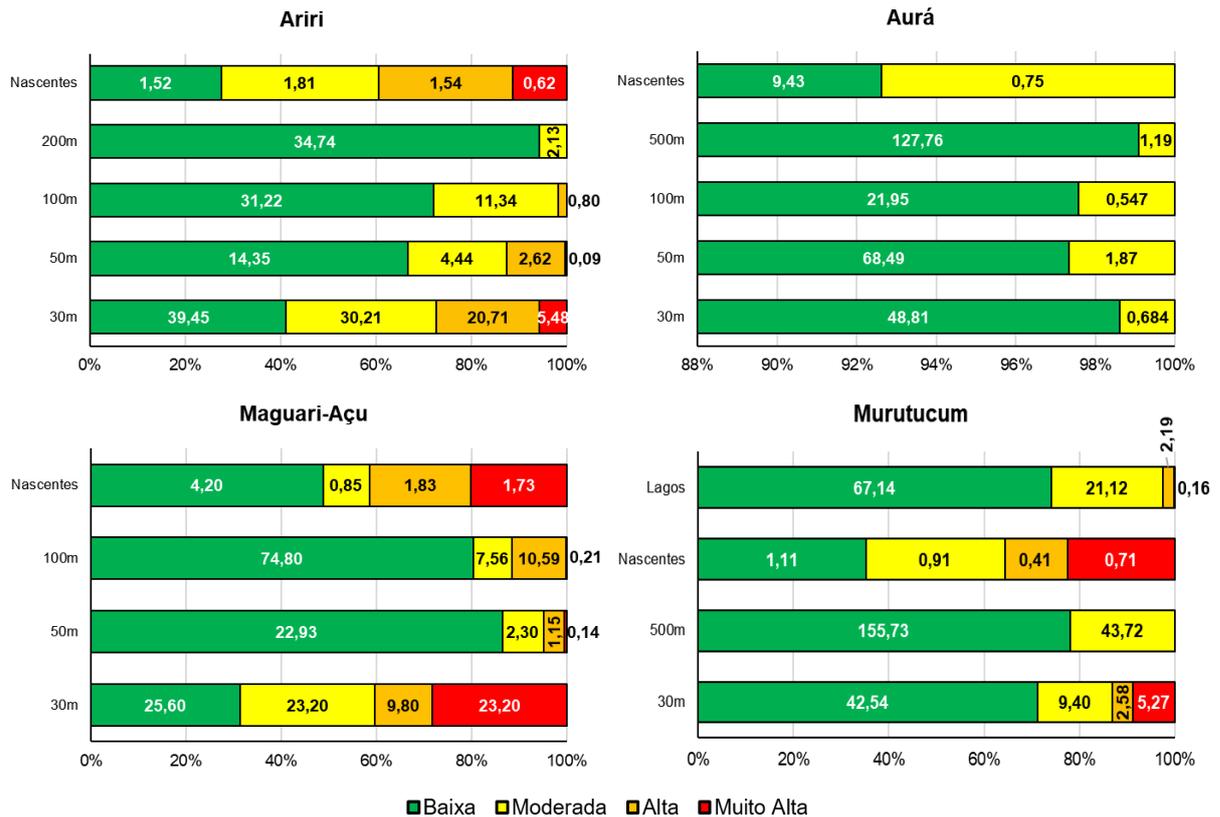
Nas microbacias, graus elevados de VRH foram mais presentes do que nas mesobacias, especialmente nas APP de nascentes, atingindo o patamar de mais de 20% nas bacias do Maguari-Açu e Murutucum. As áreas de preservação mais afetadas foram as faixas de 30 m da microbacia do Maguari-Açu, onde o percentual ficou próximo de 30% (Figura 42). O grau Alto também apresentou contribuição significativa, sobretudo na microbacia do rio Ariri, chegando perto de 30%. Portanto, a VRH está relacionada não só com a distribuição espacial dos parâmetros de vulnerabilidade, com também com as características da rede de drenagem da bacia hidrográfica.

Tabela 18 - Graus de VRH por APP das mesobacias, em hectares, em 2012 e 2015.

<b>Mesobacia do Apeú</b>						
VRH	APP 2012			APP 2015		
	30 m	50 m	Nascentes	30 m	50 m	Nascentes
<i>Baixo</i>	764,01	15,60	17,24	738,35	13,94	15,13
<i>Moderado</i>	193,95	0,18	7,14	221,62	1,84	10,03
<i>Alto</i>	39,30	*	1,25	29,56	*	1,63
<i>Muito Alto</i>	5,71	*	*	5,69	*	*
<i>Outros</i>	60,10	*	1,79	67,85	*	0,63
<b>Total</b>	<b>1063,07</b>	<b>15,78</b>	<b>27,42</b>	<b>1063,07</b>	<b>15,78</b>	<b>27,42</b>
<b>Mesobacia do Caraparu</b>						
VRH	APP 2012			APP 2015		
	30m	500m	Nascentes	30m	500m	Nascentes
<i>Baixo</i>	965,47	81,02	15,38	919,12	79,85	15,24
<i>Moderado</i>	166,75	2,47	11,16	186,83	3,77	12,13
<i>Alto</i>	31,86	0,12	1,63	21,51	*	0,79
<i>Muito Alto</i>	3,87	*	0,03	4,83	*	0,03
<i>Outros</i>	2,59	*	*	38,26	*	0,01
<b>Total</b>	<b>1170,54</b>	<b>83,62</b>	<b>28,20</b>	<b>1170,54</b>	<b>83,62</b>	<b>28,20</b>
<b>Mesobacia do Guajará-Açu</b>						
VRH	APP 2012			APP 2015		
	30m	500m	Nascentes	30m	500m	Nascentes
<i>Baixo</i>	407,65	182,30	9,91	370,65	166,54	10,19
<i>Moderado</i>	398,19	10,65	7,48	414,14	25,70	7,94
<i>Alto</i>	108,33	0,13	2,82	134,10	0,84	1,99
<i>Muito Alto</i>	10,38	*	0,20	13,42	*	0,28
<i>Outros</i>	11,86	0,01	*	4,09	0,01	*
<b>Total</b>	<b>936,40</b>	<b>193,09</b>	<b>20,40</b>	<b>936,40</b>	<b>193,09</b>	<b>20,40</b>
<b>Mesobacia do Tauá</b>						
VRH	APP 2012					
	30m	50m	100m	200m	500m	Nascentes
<i>Baixo</i>	775,74	101,23	489,61	347,04	98,64	25,25
<i>Moderado</i>	221,78	1,87	47,41	5,98	0,33	8,74
<i>Alto</i>	43,77	0,04	9,87	5,65	*	0,48
<i>Muito Alto</i>	1,00	*	1,09	*	*	*
<i>Outros</i>	4,96	0,25	0,67	0,14	0,02	*
<b>Total</b>	<b>1047,25</b>	<b>103,39</b>	<b>548,65</b>	<b>358,81</b>	<b>98,99</b>	<b>34,47</b>
<b>Mesobacia do Tauá</b>						
VRH	APP 2015					
	30m	50m	100m	200m	500m	Nascentes
<i>Baixo</i>	796,42	92,46	515,22	342,09	98,98	21,15
<i>Moderado</i>	196,40	3,22	17,80	12,31	*	10,85
<i>Alto</i>	35,82	*	5,97	2,67	*	1,64
<i>Muito Alto</i>	1,02	*	0,87	*	*	*
<i>Outros</i>	17,57	7,71	8,79	1,73	0,01	0,82
<b>Total</b>	<b>1047,25</b>	<b>103,39</b>	<b>548,65</b>	<b>358,81</b>	<b>98,99</b>	<b>34,47</b>

\*Sem informação para esse grau de VRH.

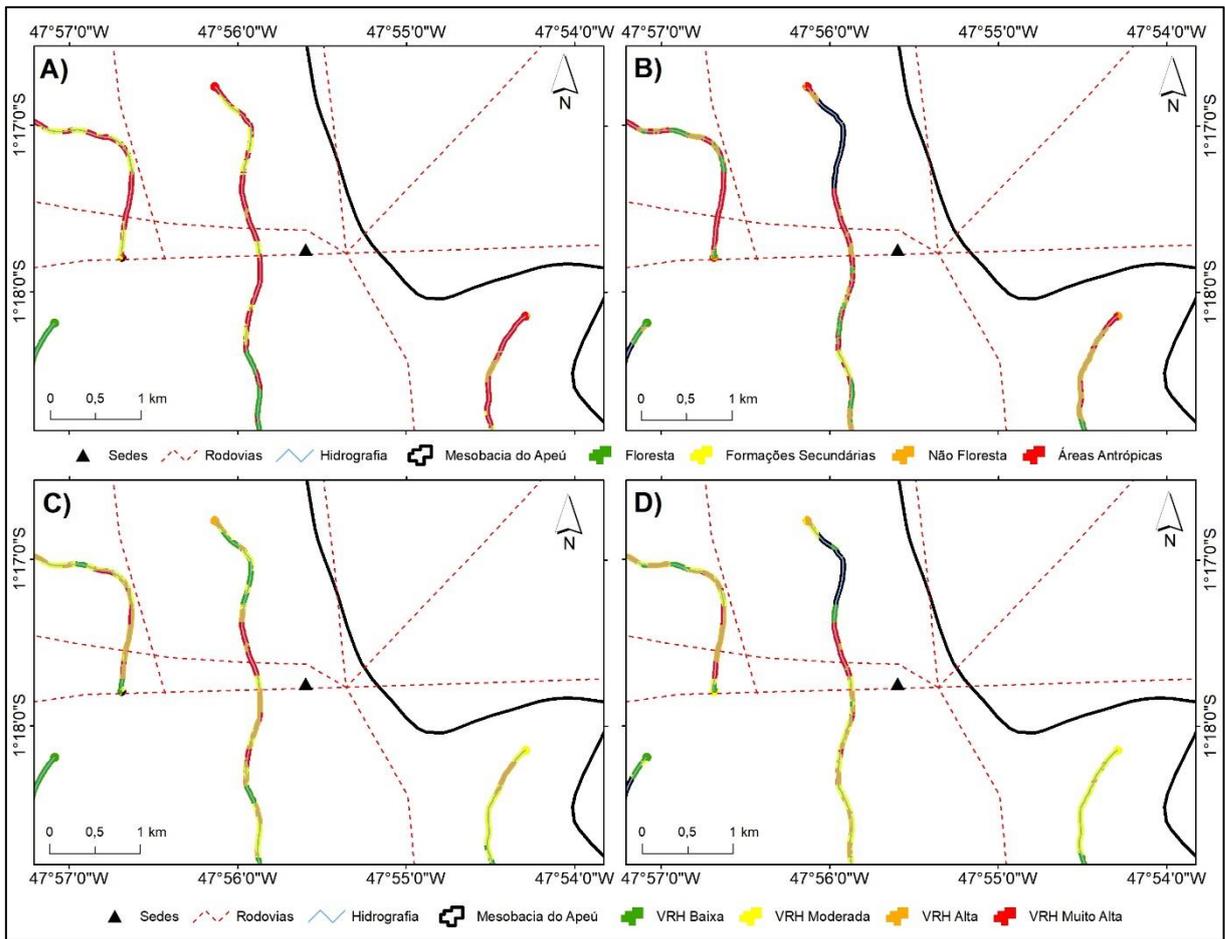
Figura 42 - Graus de VRH nas APP das microbacias, em hectares.



Assim, tanto a parte das áreas de conflito por uso e cobertura da terra quanto a de vulnerabilidade mostraram um cenário de impacto ambiental sobre os cursos d'água de menor dimensão e sobre as suas nascentes. Este panorama condiz com o que foi discutido sobre o parâmetro de pressão antrópica e de crescimento dos centros urbanos, impulsionados pelos *drivers* de mudança da paisagem. O discutido em trabalhos (ADAMS; FOWLER, 2006; OSBORNE; WILEY, 1988; SEAVY *et al.*, 2009; TABACCHI *et al.*, 2000; TONG; CHEN, 2002) desenvolvidos para a avaliação integrada da paisagem hídrica e suas perdas com o LUCC, no geral afirmam que o uso da terra/cobertura do solo são determinante no balanço de energia dentro do ciclo hidrológico; em especial as áreas de nascentes representam um ambiente de alta vulnerabilidade a expansão urbana descontrolada, onde pode ocorrer tanto a perda quantitativa de água quanto a piora de sua qualidade para o abastecimento humano e necessidades ecológicas, neste último caso gerando degradação de habitats.

Para efeito de visualização da APP, a Figura 43 mostra a sua distribuição na mesobacia do Apeú próximo a região central da cidade de Castanhal por LUCC e VRH, em 2012 e 2015.

Figura 43 - LUCC e VRH na APP de 30 m e de nascentes na mesobacia do Apeú.



A) LUC em 2012 e B) LUC em 2015 na mesobacia do Apeú; C) e D) VRH na mesma mesobacia nos anos de 2012 e 2015, respectivamente.

Por fim, é importante que seja retomada a construção inicial do desenvolvimento metodológico de estudo da vulnerabilidade no campo dos recursos hídricos, apresentada na seção 4.5, quando foi elaborada uma analogia entre as unidades territoriais do ZEE e os graus de VRH, afim de se estabelecer um modelo de análise para o objeto de estudo. De acordo com os resultados, foram fornecidas quatro tipologias de intensidade de vulnerabilidade, onde as áreas críticas foram relacionadas aos graus Alto e Muito Alto, ficando caracterizado que as mudanças na paisagem, assim como a intensificação da ocupação urbana, fornecem o cenário de expansão da VRH, principalmente, sobre a área de influência dos centros, sobre os cursos d'água de menor extensão e as suas nascentes.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa se propôs a estudar a vulnerabilidade sobre um ponto de vista até então pouco abordado na literatura técnica-científica no Brasil, sobre os recursos hídricos. A área de estudo escolhida para a investigação foi a MRMB, constituída por onze municípios, que ocupam 6.890,61 km<sup>2</sup> com 2.684.775 habitantes, estimado em 2018. Situada na área de influência do estuário da foz do rio Amazonas, região de grande diversidade corpos hídricos superficiais, como a Baía do Guajará e a bacia do rio Guamá como principal eixo de onde se ramificam a maioria das bacias aqui estudadas.

Foram aplicadas técnicas de sensoriamento remoto sobre diferentes produtos de sensores, onde, a partir da área de estudo principal, foram diferenciadas as unidades principais de estudos dos recursos hídricos segundo a legislação vigente, que são as bacias hidrográficas. Numa abordagem híbrida, elencou-se bacias de tamanho classificado como médio, mesobacias, e pequeno, microbacias; segundo as quais materiais e métodos próprios foram elaborados e utilizados.

Tendo como objetivo apresentar um desenvolvimento metodológico ao mesmo tempo factível e diferenciado, elencou-se dois critérios principais para estudar a VRH, sendo eles a Pressão Antrópica e as Mudanças de Uso e Cobertura da Terra, LUCC na sigla em inglês. O primeiro se originou na grade estatística do IBGE, onde foram estabelecidas faixas de variação de habitantes por km<sup>2</sup> para cada unidade de análise, pelo método de *Jenks*. O segundo adveio do processamento e análise de imagens dos satélites *RapidEye* e Ortofotos, através da técnica GeoBIA. Os resultados mostraram que a variável de pressão nas mesobacias é mais intensa nos grandes centros urbanos e que há extensão áreas sem a presença desse impacto, enquanto que nas microbacias, devido a sua dimensão reduzidas e localização no centro mais populoso, são densamente povoadas, estão sobre a maior influência desse parâmetro.

Por sua vez, os dados de LUCC mostraram a já intensa modificação da paisagem experimentada pela região, através das alterações das classes de cobertura pelas de uso da terra, o que ficou mais evidente na análise multitemporal na MRMB e nas mesobacias, assim como enfatizada pela determinação das classes nas microbacias. Diferente do critério de pressão, esse mostra não só como a paisagem foi alterada pela pressão humana, como também por suas atividades econômicas, como é o caso da agricultura, da pecuária e da exploração mineral.

Nesse ponto, elencou-se quatro importantes *drivers* de mudanças, onde a discussão da influência de cada um evidenciou a sua contribuição para o fenômeno observado.

Por esta proposta metodológica, a associação entre esses dois parâmetros nos indica a VRH. Os resultados vieram a mostrar um cenário ainda mais agravado para a manutenção dos recursos hídricos em quantidade e qualidade necessárias para os ecossistemas e a sociedade. Nesta perspectiva, também, as microbacias sobrepujaram a mesobacias com maior proporção de áreas com graus Alto e Muito Alto de vulnerabilidade.

Para verificar os impactos diretos sobre os recursos hídricos, foram delimitadas as APP da hidrografia de cada grupo de bacia, segundo o estabelecido em legislação. Com base nesses limites mínimos, determinou-se também áreas de conflitos, consideradas como a presença de classes de LUCC diferentes da classe de Floresta, como os próprios graus de VRH para cada faixa. Observou-se uma tendência de maior impacto sobre os cursos de menor extensão, com destaque para os de até 30 m, e aqueles localizados no entorno das nascentes, que corresponde a 50 m. Esse padrão se repetiu em ambos os casos e grupos de bacias, o que vem a evidenciar a importância da proteção desses rios, pois, são aqueles localizados mais próximos da maioria dos centros urbanos.

Com este trabalho foi possível desenvolver um arcabouço teórico-metodológico que subsidia os estudos em recursos hídricos quanto a sua vulnerabilidade em regiões metropolitanas e suas áreas de influência. O ponto fulcral foi a adoção de bacias hidrográficas de distintas dimensões, sobre as quais diferentes escalas de produtos de satélite do foram necessários. Assim, a estratégia de analisar o mesmo fenômeno em escalas cartográficas diferentes se mostrou importante para estabelecer os parâmetros de observação adequados de um fenômeno de natureza complexo, como é a vulnerabilidade.

A hipótese de trabalho estabelecida no primeiro capítulo deu o direcionamento da pesquisa acerca do estudo da vulnerabilidade como resultado das alterações de paisagem, como resultado do processo histórico de transformação urbana. Retomando esse entendimento, conclui-se que pelos resultados alcançados esse entendimento se confirmou, pois, as áreas com os maiores graus de vulnerabilidade foram aquelas em regiões de expansão urbana e com mudanças mais significativas de cobertura da terra.

Algumas recomendações fazem-se necessárias para a aplicação ou aperfeiçoamento desta metodologia. A disponibilidade de imagens de altíssima resolução como as ortofotos é pequena espacial e temporalmente, isso vale até mesmo para as imagens do *RapidEye* que foram adquiridas pela todo o território nacional somente entre os anos de 2011 e 2015. Com isso, para a aplicação desse método é necessário utilizar imagens de acesso mais amplo. Como alternativa cita-se os produtos da missão Sentinel da Agência Espacial Europeia (ESA, na sigla em inglês), lançada em 2014, com resolução espacial de até 10 m, radiométrica de 12 bits e 13 bandas

espectrais, são uma alternativa recente ao estudo de microbacias e mesobacias. Além deste, a própria série Landsat, usada em parte desse trabalho, é uma boa alternativa devido sua disponibilidade e ampla aplicação nos últimos anos, nesse caso mais adequada para bacias de maior área, devido sua resolução espacial limitada de 30 m. Quando ao parâmetro de Pressão Antrópica, além da grade estatística há também os setores censitários, os quais podem ser associados aos dados dos últimos censos demográficos e produzir um cenário de distribuição da densidade populacional da mesma forma como feita aqui, porém, talvez, não tão detalhada em escalas menores.

Outra questão relevante, diz respeito ao aperfeiçoamento do índice de VRH através da incorporação de outros parâmetros. Aqui, empregou-se o estudo das APP de forma complementar, pois, entendeu-se que analisar as consequências das mudanças de cobertura e da vulnerabilidade seria mais interessante. Mas, também uma variável de distância a rede de drenagem pudesse ser inserida. Outros parâmetros comumente vistos na literatura são as classes de solos e as feições geológicas, neste estudo essas não foram empregadas devido a incompatibilidade cartográfica e falta de atualizações recentes. Contudo, com a presença de base de dados dessa natureza sua incorporação ao estudo da VRH mostra-se como alternativa viável.

## REFERÊNCIAS

- ADAMI, M.; GOMES, A. R.; COUTINHO, A. C.; ESQUERDO, J. C. D. M.; VENTURIERI, A. Dinâmica do uso da terra no estado do Pará entre os anos de 2008 e 2012. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 17, 2015, João Pessoa, PB. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 7028-7035.
- ADAMS, K. N.; FOWLER, A. Improving empirical relationships for predicting the effect of vegetation change on annual water yield. **Journal of Hydrology**, v. 321, n. 1-4, 2006.
- ADGER, W. N. Vulnerability. **Global Environmental Change**, v. 16, n. 3 p. 268-281, 2006.
- ALMEIDA, C. A. de; COUTINHO, A. C.; ESQUERDO, J. C. D. M.; ADAMI, M.; VENTURIERI, A.; DINIZ, C. G.; DESSAY, N.; DURIEUX, L.; GOMES, A. L. High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 46, n. 3, p. 291-302, 2016.
- ALVES, D. S. Science and technology and sustainable development in Brazilian Amazon. *In: TSCHARNTKE, T.; LEUSCHNER, C.; ZELLER, M.; GUHARDJA, E.; BIDIN, A. (ed.). Stability of tropical rainforest margins: linking ecological, economic and social constraints of land use and conservation.* Springer-Verlag, Berlin, p. 493-512, 2007.
- ANDRADE, M. M. N. **Capacidade adaptativa: uma proposição metodológica de avaliação da vulnerabilidade social às inundações.** 2014. 140 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido, Belém, 2014.
- ATTANASIO, C. M.; GANDOLFI, S.; ZAKIA, M. J. B.; VENIZIANI JR., J. C. T.; LIMA, T. P. A importância das áreas ripárias para a sustentabilidade hidrológica do uso da terra em microbacias hidrológicas. **Bragantia**, v. 72, n. 4, p. 493-501, 2012.
- BARBOSA, C. C. F. **Álgebra de mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento.** São José dos Campos, SP: INPE, 1997. 157p.
- BARRETO, P.; SOUZA JR., C.; ANDERSON, A.; SALOMÃO, R.; WILES, J.; NOGUERÓN, R. **Human pressure in the Brazilian Amazon.** n. 3. Belém, PA: Imazon, 2005.
- BATISTELLA, M.; MORAN, E. F. Dimensões humanas do uso e cobertura da terra na Amazônia: uma contribuição do LBA. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 35, n. 2, p. 239-247, 2005.
- BECKER, B. K. **A urbe amazônica: a floresta e a cidade.** Rio de Janeiro: Garamond, 2013. 88p.
- BECKER, B. K. Geopolítica da Amazônia. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 19, n. 53, p. 71-86, 2005.
- BECKER, B. K.; EGLER, C. A. G. **Detalhamento da metodologia para execução do Zoneamento Ecológico-Econômico pelos estados da Amazônia Legal.** Rio de Janeiro: SAE; MMA, 1996. 40p.
- BENINI, R. M.; MENDIONDO, E; M. Urbanização e impactos no ciclo hidrológico na bacia do Mineirinho. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 2, p. 211-222, 2015.

BERTOLO, L. S.; LIMA, G. T. N. P. de; SANTOS, R. F. dos. Indexes of spatio-temporal change to reconstruct the historical evolution of a coastal region - case study: São Sebastião Island - SP. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58, n. spe. 3, p. 37-47, 2010.

BLASCHKE, T.; LANG, S.; HAY, G. J. (ed.). **Object-Based Image Analysis: spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications**. Berlin, Germany: Springer, 2008.

BLASCHKE, T. Object based image analysis for remote sensing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, p. 2-16, 2010.

BLASCHKE, T.; HAY, G. J.; KELLY, M.; LANG, S.; HOFMANN, P.; ADDINK, E.; FEITOSA, R. Q.; MEER, F.; WERFF, HARALD; COILLIE, F.; TIEDE, D. Geographic Object-Based Image Analysis – Towards a new paradigm. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 87, p. 180-191, 2014.

BRASIL. Lei nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Brasília, DF, 1997.

BRASIL. Decreto-lei nº 89.817 de 20 de junho de 1984. **Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional**. Diário Oficial da União, Brasília, 1984.

BRASIL. Lei nº 12.651 de 25 de maio de 2012. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 28 de maio de 2012.

BRIASSOULIS, H. **Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches**. Morgantown, WV: Regional Research Institute, West Virginia University, 2000.

BUENO, M. C. D. **Grade estatística: uma abordagem para ampliar o potencial analítico de dados censitários**. 2014. 239 f. Tese (Doutorado em Demografia) – Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, Campinas, 2014.

BUENO, M. C. D.; D'ANTONA, A. O. Avaliação de métodos de desagregação para geração de grades de população. **Revista Espinhaço**, UFVJM, v. 3, n. 1, p. 127-137, 2014.

CABRAL, S. L.; REIS, R. S.; FRAGOSO JR, C. R. Avaliação do efeito da urbanização na produção de sedimentos da bacia do rio Jacarecica/AL mediante uso de modelo hidrossedimentológico distribuído. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 1073-1080, 2013.

CARDOSO, A. C. D.; NEGRÃO, M. R. G.; PEREIRA, G. J. C. A expansão da RM de Belém: reflexões sobre os desdobramentos de investimentos oficiais em habitação. **Cadernos Metropolitanos**, São Paulo, v. 14, n. 28, p. 441-461, 2012.

CARMO, M. B. S. do; COSTA, S. M. F. da. A expressão metropolitana da Região Metropolitana de Belém: ainda há a cidade primaz? *In*: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL, 17, 2017, São Paulo, SP. **Anais...** São Paulo: ENANPUR, 2017. p. 1-18.

CASARIN, F.; SANTOS, M. **Água: o ouro azul e abusos dos recursos hídricos**. Rio de Janeiro: Garamond, 2011. 120p. (Desafios do século XXI)

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 37, n. 1, p. 35-46, 1991.

CORDEIRO, I. M. C. C.; ARBAGE, M. J. C.; SCHWARTZ, G. Nordeste do Pará: configuração atual e aspectos identitários. *In*: CORDEIRO, I. M. C. C.; RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.; SCHWARTZ, G.; OLIVEIRA, F. A. (org.). **Nordeste paraense: panorama geral e uso sustentável das florestas secundárias**. Belém: EDUFRA, 2017. 323p.

COSTA, A. M. S. da; FURTADO, M. P.; BEZERRA, P. E. S.; OLIVEIRA, R. S.; SILVA, W. R. S.; PINHEIRO, P. F. V. Análise multitemporal do uso e ocupação do solo na Área de Proteção Ambiental da ilha de Cotijuba, Belém, Pará. *In*: SIMPÓSIO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS NA AMAZÔNIA, 4, 2015, Belém, PA. **Anais...** Belém: UEPA/PPGCA, 2015. p. 38-47.

COSTA, A. M. S. da. **Características fisiográficas das bacias hidrográficas de Ananindeua, Pará: subsídios ao saneamento ambiental**. 2016a. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Energias Renováveis) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2016.

COSTA, A. M. S. da; BEZERRA, P. E. S.; OLIVEIRA, W. R. Análise da temperatura da superfície terrestre associada à dinâmica do uso e ocupação do solo nos municípios de Belém e Ananindeua, Pará, Brasil. *In*: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 6, 2016, Cuiabá, MT. **Anais...** Cuiabá: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2016. p. 957-967.

COSTA, A. M. S. da; ROCHA, C. P. Território, comunidade e uso e cobertura do solo na região insular do município de Ananindeua, estado do Pará. *In*: SIMÁRIO INTERNACIONAL DE CIÊNCIAS DO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE NA AMAZÔNIA, 4, 2016, Manaus, AM. **Anais...** Manaus: ANPPAS, 2016.

CUTTER, S. L. Vulnerability to environmental hazards. **Progress in Human Geography**, v. 20, n. 4, p. 529-539, 1996.

CUTTER, S. L. The vulnerability of science and the science of vulnerability. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 93, n. 1, p. 1-12, 2003.

CUTTER, S. L. A ciência da vulnerabilidade: modelos, métodos e indicadores. **Revista Crítica de Ciências Sociais**, n. 93, p. 59-69, 2011.

D'ANTONA, A. O.; DAGNINO, R. S.; BUENO, M. C. D. Distribuição da população e cobertura da terra: o lugar das Áreas Protegidas no Pará, Brasil em 2010. **Revista Brasileira de Estudos de População**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 3, p. 563-585, 2015.

DAL'ASTA, A. P.; AMARAL, S; MONTEIRO, A. M. V. Sensoriamento remoto para a caracterização intraurbana de cidades Amazônicas: uma abordagem classificatória híbrida para o caso da cidade de Santarém (PA). *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17, 2015, João Pessoa, PB. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 2661-2668.

DENT, B. D.; TORGUSON, J. S.; HODLER, T. W. **Cartography: thematic map design**. 6. ed. McGraw-Hill: Georgia, 2009. 368p.

DINIZ, C. G.; SOUZA, A. A. A.; SANTOS, D. C.; DIAS, M. C.; LUZ, N. C.; MORAES, D. R. V.; MAIA, J. S.; GOMES, A. R.; NARVAES, I. S.; VALERIANO, D. M.; MAURANO, L. E. P.; ADAMI, M. DETER-B: The New Amazon Near Real-Time Deforestation Detection System. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 8, n. 7, p. 3619-3628, 2015.

EAKIN, H.; LUERS, A. L. Assessing the vulnerability of social-environmental systems. **Annual Review of Environmental and Resources**, v. 31, p. 365-394, 2006.

FELIX, I. M.; KAZMIERCZA, M. L.; ESPINDOLA, G. M. RapidEye: a nova geração de satélites de Observação da Terra. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal, RN. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 7619-7622.

FERREIRA, J.; BLANC, L.; KANASHIRO, M.; LEES, A. C.; BOURGOIN, C.; FREITAS, J. V.; GAMA, M. B.; LAURENT, F.; MARTINS, M. B.; MOURA, N.; D'OLIVEIRA, M. V.; SOTTA, E. D.; SOUZA, C. R.; RUSCHEL, A. R.; SCHWARTZ, G.; ZWERTS, J.; SIST, P. **Degradação florestal na Amazônia: como ultrapassar os limites conceituais, científicos e técnicos para mudar esse cenário.** Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2015. 29f.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação.** São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 160p.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto.** São Paulo: Oficina da Textos, 2007. 101p.

FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R.; CHAPIN, F. S.; COE, M. T.; DAILY, G. C.; GIBBS, H. K.; HELKOWSKI, J. H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; PATZ, J. A.; PRENTICE, C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. Global consequences of land use. **Science**, v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005.

FRANCISCO, C. E. S.; COELHO, R. M.; TORRES, R. B.; ADAMI, S. F. Análise multicriterial na seleção de bacia hidrográfica para recuperação ambiental. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 1, p. 1-13, 2008.

FRANCO, V. S.; SOUZA, E. B. de; LIMA, A. M. M. de. Cheias e vulnerabilidade social: estudo sobre o Rio Xingu em Altamira/PA. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 21, e01573, 2018.

GODAR, J.; GARDNER, T. A.; TIZADO, E. J.; PACHECO, P. Actor-specific contributions to the deforestation slowdown in the Brazilian Amazon. **PNAS**, v. 111, n. 43, p. 732-745, 2014.

GODOY, A. M. G.; SOUSA, M. L. L. The river basins of Pirapó, Paranapanema 3 and Paranapanema 4: socioeconomic and environmental aspects. **Brazilian Journal of Biology**, v. 75, n. 4, suppl. 2, p. 77-95, 2015.

GONÇALVES, C. W. P. **Amazônia, Amazônias.** 3. ed. São Paulo: Contexto, 2015. 178p.

GROSBOIS, D. de; PLUMMER, R. Problematizing water vulnerability indices at a local level: a critical review and proposed solution. **Water Resources Management**, v. 29, n. 14, p. 5015-5035, 2015.

GUTMAN, G.; JANETOS, A. C.; JUSTICE, C. O.; MORAN, E. F.; MUSTARD, J. F.; RINDFUSS, R. R.; SKOLE, D.; TURNER II, B. L.; COCHRANE, M. A. (ed.). **Land Change Science**: Observing, monitoring and understanding trajectories of change on the earth's surface. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.

HESPANHOL, I. Um novo paradigma para gestão dos recursos hídricos. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 131-158, 2008.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Divisão regional do Brasil em mesorregiões e microrregiões**. v. 1. Rio de Janeiro: IBGE, 1990.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010a.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo demográfico 2010**: manual do recenseador – CD-1.09. Rio de Janeiro: IBGE, 2010b. 332p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo demográfico 2010**: aglomerados subnormais – primeiros resultados. Rio de Janeiro: IBGE, 2010c. 259p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Manual técnico de uso da terra**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2013.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Grade estatística**. Rio de Janeiro: IBGE, 2016. 28p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Sistema IBGE de Recuperação de Automática – SIDRA**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017a.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017b. 82p.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **TerraClass 2004 a 2014**: dinâmica do uso e cobertura da terra no período de 10 anos nas áreas desflorestadas da Amazônia Legal brasileira. 2016. Disponível em: [http://www3.inpe.br/cra/projetos\\_pesquisas/dados\\_terraclass.php](http://www3.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/dados_terraclass.php). Acesso em: 5 dez. 2017.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Projeto PRODES**. 2013. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: 5 dez. 2017.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598p.

KELLY, P. M.; ADGER, W. N. Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. **Climatic Change**, v. 47, n. 4, p. 325-352, 2000.

KOBIYAMA, M. Conceitos de zona ripária e seus aspectos geobiohidrológicos. *In*: SEMINÁRIO DE HIDROLOGIA FLORESTAL: ZONAS RIPÁRIAS, 1, 2003, Alfredo Wagner, SC. **Anais...** p. 1-13.

LAMBIN, E. F.; TURNER, B. L.; GEIST, H. J.; AGBOLA, S. B.; ANGELSEN, A.; BRUCE, J. W.; COOMES, O. T.; DIRZO, R.; FISCHER, G.; FOLKE, C.; GEORGE, P. S.; HOMEWOOD, K.; IMBERNON, J.; LEEMANS, R.; LI, X. B.; MORAN, E. F.; MORTIMORE, M.; RAMAKRISHNAN, P. S.; RICHARDS, J. F.; SKANES, H.; STEFFEN, W.; STONE, G. D.; SVEDIN, U.; VELDKAMP, T. A.; VOGEL, C.; XU, J. C. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. **Global Environmental Change**, v. 11, n. 4, p. 261-269, 2001.

LEAL, C. G.; BARLOW, J.; GARDNER, T.; HUGHES, R. M.; LEITÃO, R. P.; NALLY, R. M.; KAUFMANN, P. R.; FERRAZ, S. F. B.; ZUANON, J.; PAULA, F. R.; FERREIRA, J.; THOMSON, J. R.; LENNOX, G. D.; DARY, E. P.; RÖPKE, C. P.; POMPEU, P. S. Is environmental legislation conserving tropical stream faunas? A large-scale assessment of local, riparian and catchment-scale influences on Amazonian fish. **Journal of Applied Ecology**, [S.I.], 2017.

LISBÔA, E. G.; CARVALHO, J. M. C. M. de; MENDES, R. L. R. O uso da geoestatística na avaliação dos parâmetros hidrogeológicos para compor o mapa de vulnerabilidade intrínseca de aquíferos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 188-199, 2016.

LUERS, A. L. The surface of vulnerability: an analytical framework for examining environmental change. **Global Environmental Change**, v. 15, n. 3, p. 214-223, 2005.

MACHADO, G.; SILVA, E. Impactos ambientais causados pela urbanização na bacia hidrográfica do Ribeirão Quati - Londrina - PR: uma análise dos depósitos tecnogênicos. **Geographia Opportuno Tempore**, Londrina, v. 2, n. 3, p. 1-16, 2016.

MAIA, M. A.; RODRIGUES, N. B.; RITCHER, M.; RUBIM, IGOR. Modelos de correção atmosférica aplicados em imagens do sensor OLI/Landsat 8 a partir do uso de programas gratuitos: uma análise comparativa. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18, 2017, Santos, SP. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2017. p. 4888-4895.

MALTA, F. S.; COSTA, E. M. da; MAGRINI, A. Índice de vulnerabilidade socioambiental: uma proposta metodológica utilizando o caso do Rio de Janeiro, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 22, n. 12, p. 3933-3944, 2017.

MANSUR, A. V.; BRONDÍZIO, E. S.; ROY, S.; HETRICK, S.; VOGT, N. D.; NEWTON, A. An assessment of urban vulnerability in the Amazon Delta and Estuary: a multi-criterion index of flood exposure, socio-economic conditions and infrastructure. **Sustainability Science**, v. 11, n. 4, p. 625-643, 2016.

MARENGO, J. A.; SCARANO, F. R. (ed.). **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas**: relatório especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro: PBMC, COPPE-UFRJ. 184p.

MARINHO, C. A. B.; BAPTISTA, G. M. M.; MENESES, P. R. Potencialidade do sensor ADS-80 para discretização espacial de óxidos de ferro em solos da região agrícola do DF. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17, 2015, João Pessoa, PB. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 2079-2086.

MAROTTA, H.; SANTOS, R. O. dos; ENRICH-PRAST, A. Monitoramento limnológico: um instrumento para a conservação dos recursos hídricos no planejamento e na gestão urbano-ambientais. **Ambiente & Sociedade**, v. 11, n. 1, p. 67-79, 2018.

- MCGARIGAL, K.; MARKS, B. J. **Fragstats**: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1995. 122p.
- MELLO, A. Y. I.; ALVES, D. S.; LINHARES, C. A.; LIMA, F. B. Avaliação de técnicas de classificação digital de imagens landsat em diferentes padrões de cobertura da terra em Rondônia. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 537-547, 2012.
- METZGER, J. P. O que é ecologia de paisagens?. **Biota Neotropica**, v. 1, n. 1-2, p. 1-9, 2001.
- METZGER, J. P. O código florestal tem base científica? **Natureza & Ciência**, v. 8, n.1, p. 1-5, 2010.
- MEYER, P. L. **Probabilidade**: aplicações à estatística. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 444p.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2007. 422p.
- NRC. National Research Council. **Riparian areas**: functions and strategies for management. Washington, DC: National Academy Press, 2002. 444p.
- ODUM, E. P.; BARRET, G. W. **Fundamentos da Ecologia**. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 612p.
- OSBORNE, L. L.; WILEY, M. J. Empirical relationships between land use/cover and stream water quality in an agricultural watershed. **Journal of Environmental Management**, n. 26, p. 9-27, 1988.
- PACHÊCO, N. A.; SANTIAGO, A. V.; BASTOS, T. X.; CORDEIRO, A. H. F. **Boletim agrometeorológico de 2009 para Belém, PA**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2011. 39 p. (Documentos / Embrapa Amazônia Oriental, ISSN 1983-0513; 371).
- PARRY, M. L., CANZIANI, O. F., PALUTIKOF, J. P., VAN DER LINDEN, P. J.; HANSON, C. E. (ed.). **Climate Change 2007**: impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007, 976p.
- PELLING, M. **The vulnerability of the cities**: natural disasters and social resilience. London: Earthscan Publications Ltda, 2003. 212p.
- PEREIRA, B. W.; JESUINO, S. A.; MACIEL, M. N.; OLIVEIRA, F. A.; CREÃO, L. G. C. Fragmentação da vegetação arbórea na bacia hidrográfica do rio Apeú, nordeste do estado do Pará. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 55, n. 4, p. 297-305, 2012.
- PEREIRA, F. S.; VIEIRA, I. C. G. Expansão urbana da Região Metropolitana de Belém sob a ótica de um sistema de índices de sustentabilidade. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 11, n. 3, p. 731-744, 2016.
- PEREIRA, J. A. R. (coord.). **Plano Diretor do Sistema de Esgotamento Sanitário da Região Metropolitana de Belém**. v. 2. Belém: UFPA/GPHS; COSANPA, 2007. 89 p. (Relatório Técnico II – Estudos de delimitadas das bacias hidrográficas).

PEREIRA, J. L. G.; BATISTA, G. T.; THALÊS, M. C.; ROBERTIS, D. A.; VENTURIERI, A. Métrica de paisagem na caracterização da evolução da ocupação da Amazônia. **Geografia**, v. 26, n. 1, p. 59-90, 2001.

PHILIPPI JR., A.; TUCCI, C. E. M.; HOGAN, D. J.; NAVEGANTES, R. **Interdisciplinaridade em Ciências Ambientais**. São Paulo: Signus Editora, 2000. 318p.

PROAG, V. The concept of vulnerability and resilience. **Procedia Economics and Finance**, v. 18, p. 369-376, 2014.

PLUMMER, R.; LOË, R. de; ARMITAGE, D. A systematic review of water vulnerability assessment tools. **Water Resources Management**, v. 26, n. 15, p. 4327-4346, 2012.

RAMOS, A. P. M.; JÚNIOR, J. M.; DECANINI, M. M. S.; PUGLIESI, E. A.; OLIVEIRA, R. F. de; FILHO, A. C. P. Avaliação qualitativa e quantitativa de métodos de classificação de dados para o mapeamento coroplético. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 3, v. 68, p. 609-629, 2016.

ROCHA, L. S.; FERNANDES, V. O. Análise de áreas de vulnerabilidade hídrica na bacia hidrográfica de Pedras/Pituaçu através de SIG. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 25, p. 138-160, 2014.

ROSENFELD, G. H.; FITZPATRICK-LINS, K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 52, n. 2, p. 223-227, 1986.

SAMPAIO, T. V. M. Diretrizes e procedimentos metodológicos para a cartografia de síntese com atributos quantitativos via álgebra de mapas e análise multicritério. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 30, n. 1, p. 121-131, 2012.

SANTOS, M. R. S.; VITORINO, M. I.; PIMENTEL, M. A. S. Vulnerabilidade e mudanças climáticas: análise socioambiental em uma mesorregião da Amazônia. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, n. 5, p. 842-854, 2017.

SANTOS, P. T.; MARTINS, A. P. Análise da Vulnerabilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Claro (GO) utilizando geotecnologias. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 36, p. 155-170, 2018.

SEAVY, N. E.; GARDALI, T.; GOLET, G. H.; GRIGGS, F. T.; HOWELL, C. A.; KELSEY, R.; SMALL, S. L.; VIERS, J. H.; WEIGAND, J. F. Why climate change makes riparian restoration more important than ever: recommendations for practice and research. **Ecological Restoration**, v. 27, n. 3, p. 330-338, 2009.

SILVA, A. A. da; OLIVEIRA, A. P. G. de; FILHO, A. C. P.; GRIGIO, A. M. **Uso do eCognition 8 para classificação de imagem de satélite com alta resolução**. Mossoró, RN: EDUERN, 2016. 107p.

SILVA, G. B. S.; LOEBMANN, D. G. S. W.; FOLHARINI, S. O.; NOGUEIRA, S. F.; VICENTE, L. E.; ANDRADE, R. G.; FURTADO, A. L. S. **Procedimentos para correção geométrica de imagens de satélite**. Campinas, SP: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2012. 18p. (Circular Técnico, 18).

SINGH, V. P. **Computer models of watershed hydrology**. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications, 1995. 1130p.

SOUZA, M. M. de; GASTALDINI, M. C. C. Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 263-274, 2014.

SOUZA, S. R.; MACIEL, M. N. M.; OLIVEIRA, F. A.; JESUÍNO, S. A. Dinâmica da paisagem na bacia hidrográfica do Rio Apeú, nordeste do Pará, Brasil. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 9, n. 2, p. 141-150, 2011.

SOUZA FILHO, P. W. M. e; PARADELLA, W. R.; SOUZA JR, C.; VALERIANO, D. M.; MIRANDA, F. P. de. Sensoriamento remoto e recursos naturais da Amazônia. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 58, n. 3, p. 37-41, 2006.

TABACCHI, E.; L. Lambs; H. Guillo; A. M. Planty-Tabacchi; E. Muller; H. Decamps. Impacts of riparian vegetation on hydrological processes. **Hydrological Processes**, v. 14, n. 16-17, p. 2959–2976, 2000.

TAMASAUSKAS, P. F. L. F.; SOUZA, L. F. P. de; LIMA, A. M. M. de; PIMENTEL, M. A. S.; ROCHA, E. J. P. da. Métodos de avaliação da influência das áreas ripárias na sustentabilidade hidrológica em bacias hidrográficas no nordeste do estado do Pará. **Caderno de Geografia**, v. 26, n. 45, p. 172-186, 2016.

TAVARES, M. G. C. A formação territorial do espaço paraense: dos fortes à criação de municípios. **Revista Acta Geográfica**, n. 3, p. 59-83, 2008.

TOMMASELLI, A. M. G.; HASEGAWA, J. K.; GALO, M.; IMAI, N. N.; RUY, R. S. Sensoriamento remoto aerotransportado: uma abordagem usando câmeras digitais. *In*: SANTIL, F. L. P.; SILVEIRA, H.; SOUZA, M. L.; SANTOS, F. R. (org.). **Recursos tecnológicos aplicados a cartografia**. Maringá: Sthampa Gráfica e Editora, 2010, v. 1, p. 81-116.

TONG, S. T. Y; CHEN, W. Modeling the relationship between land use and surface water quality. **Journal of Environmental Management**, v. 66, n. 4, p. 377-393, 2002.

TRINDADE JR, S-C. C. da; SANTOS, T. V. Para além da cidade: entre fragmentações e permeabilidades, os desafios do planejamento e da gestão urbana no espaço metropolitano de Belém. *Ateliê Geográfico*, v. 4, n. 4, p. 20-50, 2011.

TRINDADE JR., S-C. C. da. **Formação metropolitana de Belém (1960-1997)**. Belém, PA: Paka-Tatu, 2016. 392p.

TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 2001.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Recursos hídricos no século XXI**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 328p.

TURNER II, B. L.; KASPERSON, R. E.; MATSON, P. A.; MCCARTHY, J. J.; CORELL, R. W.; CHRISTENSEN, L.; ECKLEY, N.; KASPERSON, J. X.; LUERS, A.; MARTELLO, M. L.; POLSKY, C.; PULSIPHER, A.; SCHILLER, A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. **PNAS**, v. 100, n. 4, 2003, p. 8074-8079.

UN. United Nations. **Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development**. 2015. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org>. Acesso em: 15 out. 2017.

USGS. United States Geological Survey. **Landsat 8 (L8) data user's handbook**. version 2.0. South Dakota: USGS, 2016.

VALLE JR, R. F.; GALBIATTI, J. A.; PISSARRA, T. C. T.; MARTINS FILHO, M. V. Diagnóstico do conflito de uso e ocupação do solo na bacia do rio Uberaba. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 6, n. 01, p. 40-52, 2013.

VARGAS, R. R.; BARROS, M. S.; SAAD, A. R.; ARRUDA, R. O. M.; AZEVEDO, F. D. Assessment of the water quality and trophic state of the Ribeirão Guaraçau Watershed, Guarulhos (SP): a comparative analysis between rural and urban areas. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 13, n. 2, e2170, 2018.

VASCONCELOS, V. V.; MOMM, S.; CANIL, K.; NOGUEIRA, F. R. Disaster risk management and hydrographic basin analysis: the geotechnical map of suitability for the urbanization of Itapevi - São Paulo, Brazil. **Cadernos Metr pole**, São Paulo, v. 20, n. 42, p. 371-398, 2018.

VELOSO, T. Políticas públicas, planejamento e gestão urbanos no ambiente metropolitano: estudos sobre a Região Metropolitana de Belém. **ACTA Geográfica**, Boa Vista, v. 5, n. 10, p. 55-73, 2011.

VELOSO, T.; TRINDADE JR., S-C. C. da. Dinâmicas sub-regionais e expressões metropolitanas na Amazônia brasileira: olhares em perspectiva. **Novos Cadernos NAEA**, v. 17, n. 1, p. 177-202, 2014.

VENTICINQUE, E.; FORSBERG, B.; BARTHEM, R.; PETRY, P.; HESS, L.; MERCADO, A.; CAÑAS, C.; MONTOYA, M.; DURIGAN, C.; GOULDING, M. An explicit GIS-based river basin framework for aquatic ecosystem conservation in the Amazon. **Earth System Science Data**, v. 8, n. 2, p. 651-661, 2016.

VIEIRA, I. C. G.; TOLEDO, P. M. de; ALMEIDA, A. Análise das modifica es da paisagem da região bragantina, no Pará, integrando diferentes escalas de tempo. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 59, n. 3, p. 27-30, 2007.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1975. 245p.

WATRIN, O. S.; SANTOS, J. R.; FILHO, M. V. Análise da dinâmica da paisagem do nordeste paraense através de técnicas de geoprocessamento. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, 1996, Salvador, BH. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. p. 427-433.

ZAKIA, M. J. B.; FERRAZ, F. F. B.; RIGHETTO, A. M.; LIMA, W. P. Delimita o da zona ripária de uma microbacia. **Revista Agrogeoambiente**, [S.I.], 2009.

ZANELLA, M. E; OLÍMPIO, J. L. S; COSTA, M. C. L; DANTAS, E. W. C. Vulnerabilidade socioambiental do baixo curso da Bacia Hidrográfica do Rio Cocó, Fortaleza-CE. **Revista Sociedade e Natureza**, v. 2, n. 25, p. 317-332. 2013.