

Trabalho de Graduação  
Curso de Graduação em Geografia

**CARACTERIZAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE INUNDAÇÃO NA REGIÃO DA  
NHECOLÂNDIA POR MEIO DE IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO (ESPACIAL E  
TEMPORAL) DA COLEÇÃO PLANET DE SATÉLITES**

**Mariana Dias Ramos**

**Orientador: Prof. Dr. Didier Gastmans  
Coorientador: Prof. Dr. Eder Renato Merino**

Rio Claro (SP)

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

MARIANA DIAS RAMOS

CARACTERIZAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE INUNDAÇÃO NA  
REGIÃO DA NHECOLÂNDIA POR MEIO DE IMAGENS DE  
ALTA RESOLUÇÃO (ESPACIAL E TEMPORAL) DA  
COLEÇÃO PLANET DE SATÉLITES

Trabalho de Graduação apresentado ao Instituto  
de Geociências e Ciências Exatas - Campus de  
Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista  
Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau  
de Bacharel em Geografia.

Rio Claro - SP

2022

R175c Ramos, Mariana Dias

Caracterização da frequência de inundação na região da Nhecolândia por meio de imagens de alta resolução (espacial e temporal) da coleção Planet de satélites / Mariana Dias Ramos. -- Rio Claro, 2022

59 p. : tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado e licenciatura - Geografia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Didier Gastmans  
Coorientador: Eder Renato Merino

1. Áreas Alagadas. 2. Nanossatélites. 3. Google Earth Engine. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

MARIANA DIAS RAMOS

CARACTERIZAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE INUNDAÇÃO NA  
REGIÃO DA NHECOLÂNDIA POR MEIO DE IMAGENS DE  
ALTA RESOLUÇÃO (ESPACIAL E TEMPORAL) DA  
COLEÇÃO PLANET DE SATÉLITES

Trabalho de Graduação apresentado ao Instituto  
de Geociências e Ciências Exatas - Campus de  
Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista  
Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau  
de Bacharel em Geografia.

Comissão Examinadora

Orientador: Prof. Dr. Didier Gastmans

Coorientador: Prof. Dr. Eder Renato Merino

Dr. Hudson de Azevedo Macedo

Dra. Gabriela Takahashi Miyoshi

Rio Claro, 16 de maio de 2022.



Assinatura da aluna



Assinatura do orientador

Dedico esta monografia a meu avô, João Batista Marques Dias (*in memoriam*), que me ensinou metade do que sei sobre amor.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Lucilena e Francisco, que sempre me apoiaram e me respeitaram em minha caminhada em busca dos meus objetivos. Também à minha irmãzinha de pelo, Mel, que está comigo há 13 anos.

À vó Rosa, por ser a minha senhora de companhia, por aceitar morar comigo nesses tempos difíceis e pela nossa troca de cuidados e carinhos diários. Que venham muitas tardes de café para nós.

Aos meus familiares do grupo Família Moraes que, mesmo sem entender, sempre me incentivaram e demonstraram apoio, especialmente no primeiro ano de graduação.

Ao Carlos Marques, meu primeiro orientador, o qual me deu a primeira oportunidade profissional em Rio Claro e foi essencial para que eu não desistisse.

Ao Didier e ao Tolima, por serem os primeiros a acreditarem no meu potencial dentro da academia, abrindo-me portas e a minha própria mente.

Ao Eder, grande responsável pelo meu amadurecimento em relação à pesquisa e ao Pantanal. Sempre exigente em relação à qualidade, mas também sempre paciente com todo o processo do meu desenvolvimento até 'chegar lá'.

À professora Célia Montes e ao professor Adolfo Melfi, por me aceitarem e me incentivarem ao longo do projeto temático, sempre solícitos para qualquer suporte institucional.

Ao Thiago Herculano e à família Pereira, por serem a minha família em Rio Claro.

Aos meus amigos da turma 59 da Geografia, em especial Leilso, Andrezinho, Anna, Melina, Luiz, Isa, Luisa, Rafa e Eric. Também aos meus amigos do grupo Talismã. Foi muito importante contar com vocês nessa caminhada.

Aos meus amigos de kitnet e república, Ana, Milhouse, Jesus, Thaisinha, Monique e Felipe, por todos os bons momentos vividos e por me ensinarem tanto sobre convivência.

Aos amigos Geoplaners, por compartilharem comigo as gestões de 2017, 2018 e 2019, todos essenciais para o desenvolvimento das minhas habilidades profissionais.

Aos professores e funcionários da Unesp, que desempenharam seus papéis com excelência. Em especial ao Gil Donizetti, por me acolher em sua casa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento da pesquisa de iniciação científica que motivou este trabalho (processo 2019/1440-0).

Finalmente, agradeço ao Marcos Rosa pela mais recente oportunidade profissional dentro do projeto MapBiomass.

## RESUMO

A região da Baixa Nhecolândia é uma das paisagens mais icônicas da Bacia do Pantanal. Sua morfologia única é composta por mais de 10.000 lagoas com águas salino-alcálicas e água doce que coexistem em uma área aproximada de 12.000km<sup>2</sup>. Essa região está sujeita a alagamentos sazonais que afetam o escoamento superficial, porém, pouco se conhece sobre sua dinâmica de inundação. Produtos e métodos de análise com base em séries temporais de dados orbitais têm sido amplamente utilizados para reconhecimento do padrão de inundação de áreas alagáveis, consequentemente ajudando a ampliar o conhecimento dos processos geomorfológicos, hidrológicos e ecológicos dessas regiões. A implantação recente de sensores de alta resolução temporal e espacial em escala global, como a coleção de nanossatélites PlanetScope, fornecem a possibilidade de melhor mapear eventos altamente sazonais em escalas locais, principalmente na região da Nhecolândia. O objetivo principal deste trabalho foi identificar e analisar padrões de ocorrências das transformações na paisagem mediante a caracterização da frequência de inundação de três áreas piloto na região da Nhecolândia, a partir de imagens PlanetScope processadas em ambiente de computação em nuvem da plataforma Google Earth Engine. Foram gerados produtos como mapas de frequência de inundação, gráficos de superfície de água ao longo da série temporal e composições RGB do comportamento espaço-temporal da inundação. Foi observado que o pico de inundação das áreas estudadas está diretamente associado aos picos de precipitação e ao baixo gradiente topográfico da região, com um intervalo médio de dois meses para o pulso da inundação se manifestar na área mais ao norte e ao sul. Esses produtos podem ser considerados como a primeira sistematização de alta resolução (espacial e temporal) dos alagamentos sazonais dessas áreas.

**Palavras-Chave:** Áreas Alagadas. Nanossatélites. Google Earth Engine.

## ABSTRACT

The Lower Nhecolândia region is one of the most iconic landscapes of the Pantanal Basin. Its unique morphology is composed of more than 10,000 saline-alkaline and freshwater lakes that coexist in an area of approximately 12,000 km<sup>2</sup>. This region is subject to seasonal flooding that affects surface runoff; however, little is known about its flood dynamics. Products and analysis methods based on time series of orbital data have been widely used to recognize the flooding pattern of wetlands, consequently contributing to expand the knowledge of the geomorphological, hydrological, and ecological processes of these regions. The recent deployment of temporal and spatial high-resolution sensors on a global scale, such as the PlanetScope nanosatellite collection, provides the possibility to better map highly seasonal events at local scales, mainly in the Nhecolândia region. The main objective of this work was to identify and analyze patterns of occurrence of transformations in the landscape, through the characterization of the frequency of flooding in the region of Nhecolândia, from PlanetScope images processed on cloud computing environment Google Earth Engine platform. Products such as flood frequency maps, water surface over the time series charts, and RGB compositions of the spatiotemporal flood behavior were generated. It was observed that the flood peak in the studied areas is directly associated with precipitation peaks and with the low topographic gradient of the region, with an average interval of two months for the flood pulse to manifest itself in the northern and southern areas. These products can be considered as the first high-resolution systematization (spatial and temporal) of seasonal flooding in these areas.

**Keywords:** Wetlands. Nanosatellites. Google Earth Engine.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bacia do Pantanal.....	15
Figura 2 - Imagens Planet que ilustram as grandes variações que ocorrem na Nhecolândia entre os períodos de (A) seca e (B) cheia.....	18
Figura 3 - Comparação entre imagens PlanetScope e de sensores tradicionais.....	21
Figura 4 - Fluxograma dos métodos utilizados para o processamento das imagens PlanetScope.....	23
Figura 5 - Localização da Área de Estudo.....	24
Figura 6 - Comparação do ápice de cheia e de seca para a Área 1.....	31
Figura 7 - Comparação do ápice de cheia e de seca para a Área 2.....	32
Figura 8 - Comparação do ápice de cheia e de seca para a Área 3.....	33
Figura 9 - Mosaico de imagens PlanetScope RGB da Área 1 para o período observado.....	36
Figura 10 - Mosaico de imagens PlanetScope RGB da Área 2 para o período observado.....	37
Figura 11 - Mosaico de imagens PlanetScope RGB da Área 3 para o período observado.....	38
Figura 12 - Mapa de frequência de inundação da Área 1 a partir do processamento de 103 imagens PlanetScope reclassificadas.....	42
Figura 13 - Mapa de frequência de inundação da Área 2 a partir do processamento de 102 imagens PlanetScope reclassificadas.....	43
Figura 14 - Mapa de frequência de inundação da Área 3 a partir do processamento de 100 imagens PlanetScope reclassificadas.....	44
Figura 15 - Dinâmica de áreas alagadas e sujeitas a alagamentos observadas no período de outubro de 2017 a julho de 2021 para a Área 1.....	45
Figura 16 - Dinâmica de áreas alagadas e sujeitas a alagamentos observadas no período de outubro de 2017 a julho de 2021 para a Área 2.....	47
Figura 17 - Dinâmica de áreas alagadas e sujeitas a alagamentos observadas no período de outubro de 2017 a julho de 2021 para a Área 3.....	47
Figura 18 - Mapeamento da frequência de inundação do ano de 2018 na Área 1 em diferentes trabalhos.....	49
Figura 19 - Mapeamento da frequência de inundação do ano de 2018 na Área 2 em diferentes trabalhos.....	50
Figura 20 - Mapeamento da frequência de inundação do ano de 2018 na Área 3 em diferentes trabalhos.....	51

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparação dos valores referentes à inundação ao longo da série temporal para as três áreas .....	355
Gráfico 2 - Soma dos Valores de Água e Vazante Úmida Reclassificados referentes à Área 1.....	42
Gráfico 3 - Soma dos Valores de Água e Vazante Úmida Reclassificados referentes à Área 2.....	43
Gráfico 4 - Soma dos Valores de Água e Vazante Úmida Reclassificados referentes à Área 3.....	44

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Síntese da reclassificação das imagens com a ferramenta ' <i>remap</i> '.....	28
Quadro 2 - Exemplo de matriz de confusão do produto do classificador <i>Random Forests</i> da Área 1 no dia 26 de setembro de 2020. ....	34
Quadro 3 - Cálculo do aumento da superfície de água entre as imagens mais secas e mais inundadas das áreas piloto. ....	34

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	15
2.1	A BACIA DO PANTANAL .....	15
2.2	A BAIXA NHECOLÂNDIA .....	17
2.3	SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A SISTEMAS AQUÁTICOS .....	19
2.4	NANOSSATÉLITES.....	20
2.5	PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS EM NUVEM .....	21
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS NO PROJETO</b> .....	23
3.1	ÁREA DE ESTUDO E PERÍODO DE OBSERVAÇÃO .....	24
3.2	IMAGENS PLANET .....	25
3.3	GOOGLE EARTH ENGINE .....	26
<b>3.3.1</b>	<b>Classificação Supervisionada</b> .....	26
<b>3.3.2</b>	<b>Frequência de Inundação</b> .....	28
<b>4</b>	<b>RESULTADOS OBTIDOS</b> .....	30
4.1	CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA EM IMAGENS PLANETSCOPE .....	30
4.2	DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA INUNDAÇÃO DA REGIÃO DA NHECOLÂNDIA.....	35
4.3	FREQUÊNCIA DA INUNDAÇÃO DA REGIÃO DA NHECOLÂNDIA .....	41
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO</b> .....	48
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	53
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	54

## 1 INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto tem se destacado devido à sua relevância em estudos de recursos aquáticos continentais, sobretudo para a identificação e monitoramento das grandes áreas alagadas, as *wetlands* (OZESMI; BAUER, 2002). O uso de imagens orbitais, obtidas por sensores de radar e multiespectrais, é grande responsável pelo mapeamento sistemático dessas áreas, bem como pelo estudo de suas características e usos (FINLAYSON; MILTON; PRENTICE, 2018). A análise de séries temporais de imagens permite identificar padrões de ocorrência, alterações na paisagem e demais componentes chave da dinâmica desses ambientes lacustres.

A Bacia do Pantanal possui área aproximada de 150.000 km<sup>2</sup>, ocupando parte dos estados brasileiros Mato Grosso e Mato Grosso do Sul e também abrangendo parte da Bolívia e Paraguai, sendo considerada uma das maiores regiões contínuas de áreas alagadas do mundo (ASSINE *et al.*, 2015a; KEDDY *et al.*, 2009). Os distintos padrões hidrossedimentológicos resultam em complexos ecossistemas e na valiosa biodiversidade do Pantanal (JUNK; BAYLEY; SPARKS, 1989; JUNK *et al.*, 2006). A região da Nhecolândia representa uma das paisagens mais conhecidas do Pantanal pois, em sua porção sul, apresenta mais de 10.000 lagoas distribuídas em uma área aproximada de 12.000 km<sup>2</sup>.

As lagoas da Nhecolândia se diferem em suas características hidrobiogeoquímicas, variando desde a ocorrência de água salino-alcálica a água doce, e também apresentam diferentes tipos de vegetação aquática (ALMEIDA *et al.*, 2011). Além da concentração única de lagoas, esse ambiente lacustre conta com uma densa rede de canais rasos esporadicamente alagados e de larguras variáveis, localmente conhecidos como vazantes (MERINO; ASSINE, 2020). Os processos que envolvem a dinâmica hidrológica da região da Nhecolândia são de alta sazonalidade, como a inundação das lagoas e a atuação das vazantes no escoamento superficial. Apesar da Nhecolândia apresentar características únicas e ser alvo de um grande número de pesquisas, não há estudos envolvendo análises de alta resolução temporal e espacial sobre o escoamento e inundações da região (COSTA; TELMER, 2006).

O monitoramento das *wetlands* com séries temporais permite manter um inventário atualizado das áreas de preservação, do uso e da cobertura da terra e da atividade humana que podem constituir possíveis ameaças a esses ecossistemas (FINLAYSON; MILTON; PRENTICE, 2018). Por outro lado, estudos de corpos hídricos

enfrentam limitações de sistemas sensores tradicionais, sendo as resoluções espaciais e temporais os principais desafios de pesquisas relacionadas às águas continentais (CARVALHO JÚNIOR, 2018; PEREIRA; ABREU; MAILLARD, 2017). De acordo com tais pesquisas, a resolução espacial interfere no estudo de ambientes ou de alvos de dimensões reduzidas, da mesma forma, que a resolução temporal, ou o tempo de revisita dos sistemas sensores, costuma ser mais alta do que muitos processos importantes e de alta sazonalidade em ambientes lacustres.

Atualmente, a incorporação e uso de nanossatélites em estudos hídricos ganha espaço no debate das inovações tecnológicas e seu aporte para o desenvolvimento científico (COOLEY *et al.*, 2019). Os nanossatélites são caracterizados por possuírem dimensões e peso reduzidos em relação aos satélites convencionais tradicionais devido a redução dos seus sensores e componentes eletrônicos. São projetados para orbitarem em constelações compostas por dezenas de satélites na intenção de superar as lacunas da resolução temporal, conseguindo um imageamento de todo o globo com revisita diária, e também da resolução espacial, com sensores capazes de capturar informações de dimensões sub métricas (CARVALHO JÚNIOR, 2018). A maior constelação de nanossatélites da atualidade é da empresa *Planet Labs*, com mais de 200 sistemas sensores *PlanetScope* em órbita (STRICK *et al.*, 2019; PEREIRA *et al.*, 2019). Essa constelação consegue capturar imagens diárias de todo o globo com resolução espacial média de três metros (PLANET LABS, 2016).

Como alternativas para a o aproveitamento máximo dos dados espaço-temporais provenientes de nanossatélites, apesar das limitações espectrais e de calibração, estão o processamento de imagens utilizando computação e inteligência artificial (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019). A computação em nuvem representa uma grande novidade para o geoprocessamento, principalmente no que diz respeito a trabalhos em que é necessário manipular grande quantidade de dados e/ou em que se utilizam imagens orbitais, tanto para otimização do tempo, quanto para aplicação de escalas e estudos ainda não testados (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019; CARVALHO JÚNIOR, 2018; GORELICK *et al.*, 2017).

Uma das principais plataformas da atualidade é o *Google Earth Engine* (GEE), da qual o usuário pode controlar o processamento de dados por meio de *scripts* personalizados (GORELICK *et al.*, 2017). Dentre as ferramentas de processamento de imagens oferecidas pelo GEE estão os classificadores supervisionados baseados em aprendizado de máquina. Esses classificadores utilizam métodos computacionais

para organizar o conhecimento existente sobre o objeto ou área de estudo, usando a inteligência artificial para rotular grandes quantidades de dados de acordo com características pré-definidas (MITCHELL, 1997). O processamento de imagens de nanossatélites na plataforma de computação em nuvem do Google Earth Engine representa hoje um campo produtivo para estudos de sistemas aquáticos continentais.

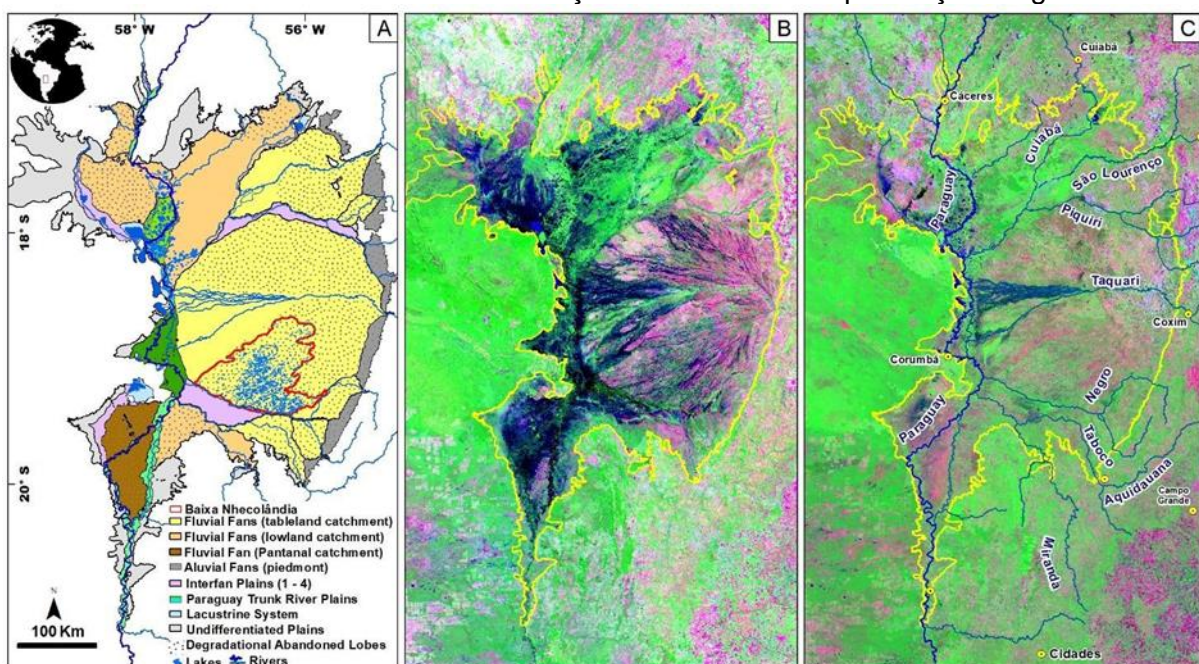
Considerando a temática exposta, este trabalho busca responder, tanto em uma escala temporal quanto espacial, algumas questões: como se dão os padrões de comportamento da superfície de água nas lagoas e vazantes da Nhecolândia? Quais são as alterações da paisagem a partir do escoamento superficial? Como os fatores climáticos e topográficos influenciam nessa dinâmica? Qual o ganho de informação que os produtos de nanossatélites proporcionam para estudos de ambientes como a Nhecolândia? Para isso, o presente trabalho teve por objetivo caracterizar a dinâmica da frequência de inundação da região da Nhecolândia a partir da análise de séries temporais de imagens dos nanossatélites *PlanetScope*, por meio do processamento de dados na plataforma de computação em nuvem do GEE. A partir da disponibilidade de dados e capacidade de processamento, buscou-se gerar novas informações de grande detalhe espacial e temporal desse ecossistema que possam contribuir como embasamento científico para conhecimento e preservação da área.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A BACIA DO PANTANAL

A Bacia do Pantanal está inserida na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Paraguai, ocupa uma superfície aproximada de 150.000 km<sup>2</sup> e abrange parte dos estados brasileiros Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, também ocupando parte da Bolívia e Paraguai, sendo considerada uma das maiores regiões contínuas de áreas alagadas (*wetlands*) do mundo (AB'SÁBER, 1988; KEDDY *et al.*, 2009; ASSINE *et al.*, 2015a). Essa planície aluvial é alimentada por rios que transportam sedimentos oriundos dos planaltos circundantes, como Maracaju-Campo Grande e Taquari-Itiquira a leste, Guimarães e Parecis ao norte, Urucum-Amolar a oeste, e Bodoquena na parte sul (ASSINE, 2003). O rio Paraguai é considerado o rio-tronco do sistema deposicional moderno (Figura 1) (ASSINE *et al.*, 2015b). O Pantanal é uma bacia sedimentar tectonicamente ativa caracterizada por falhas em sua margem e blocos de falhas na subsuperfície que, junto com terremotos associados, geram áreas propensas a inundações permanentes em diferentes sistemas deposicionais (ASSINE *et al.*, 2015b; MERINO e ASSINE, 2020).

**Figura 1** - Bacia do Pantanal. (A) Sistemas deposicionais modernos da Bacia do Pantanal baseado em Assine *et al.* (2015a); (B) Bacia do Pantanal durante a cheia; (C) Bacia do Pantanal durante a seca. A coloração azul evidencia a presença de água.



Fonte: Adaptada de Assine *et al.* (2015a).

O clima é tropical de savana (Aw), segundo a classificação de Köppen (1931). O Sistema de Monção da América do Sul (SMAS) tem grande influência no regime de chuvas da região, de sazonalidade bem definida, com verões chuvosos e invernos secos (PLINK-BJÖRKLUND, 2015). Além da precipitação, a dinâmica hidrológica do Pantanal é controlada pelo pulso de inundação dentro da bacia, esse pulso se dá em uma direção de norte a sul e demora meses para se completar, inundando os distintos sistemas deposicionais de forma particular (HAMILTON; SOUZA; COUTINHO, 1998; PADOVANI, 2010). As diferentes características hidrossedimentológicas se somam à grande diversidade fitogeográfica do Pantanal, visto que se trata de uma área de convergência e de remanescentes dos biomas Cerrado, Amazônia, Mata Atlântica e Chaco (POTT; SILVA, 2015), resultando em complexos e diferentes ecossistemas que ajudam a caracterizar a biodiversidade do Pantanal como uma das maiores do mundo (JUNK *et al.*, 2006, 1989; PADOVANI, 2010).

Dentre os leques aluviais, planícies fluviais e sistemas lacustres, que compõem o trato deposicional moderno da bacia, o megaleque do rio Taquari se destaca pois apresenta uma forma circular com 50.000 km<sup>2</sup> de área aproximada, equivalente a 37% da área total da bacia (ASSINE *et al.*, 2015b; ZANI *et al.*, 2009; ZANI; ASSINE; MCGLUE, 2012). O rio Taquari é responsável por transportar mais de 72% do total de sedimentos da Bacia do Pantanal, as altitudes do megaleque variam de 85 a 190 metros, e o baixo gradiente da planície fluvial, somado ao escoamento raso e lento, resultam na retenção da maior parte dos sedimentos dentro da bacia (ZANI; ASSINE; MCGLUE, 2012; ASSINE *et al.*, 2015b). O rio Taquari possui o seu atual lobo deposicional característico de uma densa rede de canais distributários formados por avulsões, e o principal processo atuante no megaleque é a construção e abandono de lobos deposicionais (CORENBLIT *et al.*, 2003; ZANI; ASSINE, 2011).

A porção sul do megaleque do Taquari é conhecida como Nhecolândia e ocupa uma área aproximada de 26.900 km<sup>2</sup> (ASSINE *et al.*, 2005). A região da Nhecolândia é limitada pelo rio Taquari (ao norte) e pelo rio Negro (ao sul), podendo ser subdividida em duas unidades geomorfológicas distintas: Alta e Baixa Nhecolândia. A Alta Nhecolândia se localiza na porção nordeste, apresenta processos deposicionais controlados por fluxos de sedimentos mais recentes e que cobrem os lobos deposicionais abandonados do rio Taquari (ASSINE, 2003); na porção sudoeste, encontra-se a Baixa Nhecolândia, área de interesse do presente trabalho.

## 2.2 A BAIXA NHECOLÂNDIA

A região da Baixa Nhecolândia representa uma das paisagens mais famosas do Pantanal, pois possui mais de 10.000 lagoas de diferentes características hidrogeoquímicas que coexistem em uma área aproximada de 12.000 km<sup>2</sup>, além de uma densa rede de canais distributários e uma variedade de vegetação aquática (EVANS; COSTA, 2013; GUERREIRO *et al.*, 2018; ZANI; ASSINE, 2011; PEREIRA *et al.*, 2020). Essa região possui temperatura média de 25°C, com taxas anuais de precipitação de ~1.100mm e evapotranspiração de 1.400 mm; a estação seca é predominante nos meses de julho a outubro, enquanto os períodos de cheia se dão de fevereiro a abril (EVANS; COSTA, 2013; FURIAN *et al.*, 2013; GUERREIRO *et al.*, 2018).

As lagoas da Nhecolândia podem ser classificadas de acordo com a ocorrência de água salino-alkalina ou doce, sendo chamadas localmente de 'salinas' ou 'baías', respectivamente. As lagoas de água doce possuem baixo valor de condutividade elétrica (da ordem de 0,3 mS/cm), valores de pH menores que 8 e são colonizadas por diversas macrófitas aquáticas em sua superfície (ALMEIDA *et al.*, 2003; COSTA; TELMER, 2006; EVANS; COSTA, 2013; GUERREIRO *et al.*, 2018; PEREIRA *et al.*, 2020); já as salinas representam 10% do total de lagoas da região, apresentam valores de pH acima de 8 e podem ser identificadas pela ausência de vegetação aquática e presença de cianobactérias que, por vezes, atribuem diferentes colorações à água (COSTA; TELMER, 2006; PEREIRA *et al.*, 2020).

A origem da diversidade geoquímica dessas lagoas, que apresentam formas circulares ou elipsoidais, ainda não é um consenso entre a comunidade acadêmica. A salinidade observada em algumas lagoas pode resultar de um processo contínuo de acumulação controlado pela ocorrência de horizontes de baixa permeabilidade na cobertura do solo em torno das lagoas sob condições climáticas atuais (FURIAN *et al.*, 2013). Adicionalmente, estudos recentes também apontam que mudanças ocorreram no funcionamento biogeoquímico das lagoas salino-alkalinas durante o Holoceno tardio (GUERREIRO *et al.*, 2018; MCGLUE *et al.*, 2017), e reportam que as águas das lagoas evoluem em uma via alcalina sob a influência da evaporação, nesse contexto, o pH da água aumenta com o aumento da concentração, atingindo valores próximos a 10 e podendo ser importante fonte de gases de efeito estufa (BARBIERO *et al.*, 2018). Evans & Costa (2013), e Costa & Telmer (2006) contribuem para o

mapeamento e classificação dessas baías e salinas e alertam sobre a escassez de informações sobre a dinâmica do fluxo de inundação da região.

A dinâmica hídrica da Nhecolândia é moldada por processos altamente sazonais, os quais resultam em mudanças significativas na paisagem das lagoas e canais distributários (HAMILTON; SOUZA; COUTINHO, 1998). Esses canais distributários são conhecidos localmente como 'vazantes', caracterizados por cursos de água rasos e esporadicamente alagados, alimentados pela água da chuva e do transbordamento do rio Taquari (MERINO; ASSINE, 2020). As vazantes são responsáveis pela drenagem superficial da região, em períodos de inundação, esses canais conectam as lagoas de água doce e drenam a água sentido rio Negro (ASSINE *et al.*, 2015a; FURIAN *et al.*, 2013). As lagoas salino-alcálicas, por sua vez, não participam da dinâmica do escoamento tanto em subsuperfície pela formação dos horizontes impermeáveis quanto pela atuação de barreiras arenosas levemente elevadas, localmente conhecidas como 'cordilheiras', que são recobertas por densa vegetação arbórea (BARBIERO *et al.*, 2008, FURIAN *et al.*, 2013) (Figura 2).

**Figura 2** - Imagens Planet que ilustram as grandes variações que ocorrem na Nhecolândia entre os períodos de (A) seca e (B) cheia. Indicação em vermelho da transição da presença de água na vazante no período de seca e de cheia; Destaque em amarelo para exemplos de lagoas salino-alcálicas; Destaque em azul para exemplos de lagoas de água doce.



Fonte: Elaborado pela autora.

### 2.3 SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A SISTEMAS AQUÁTICOS

O estudo de sistemas aquáticos vem ganhando destaque entre a comunidade acadêmica e civil à medida em que a conscientização global sobre a importância do uso correto, responsável e sustentável dos recursos hídricos aumenta (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019). Por sua vez, os estudos dos corpos hídricos continentais podem ser limitados por dificuldades de aquisição de dados, sejam eles *in situ* ou provenientes de sensoriamento remoto (COOLEY *et al.*, 2019). Para trabalhar com fluxo de inundação ou monitoramento de ambientes lacustres, por exemplo, os principais desafios do sensoriamento remoto são referentes às limitações dos sistemas orbitais, como a baixa resolução temporal, e o fato de que algumas dinâmicas de inundação possuem um ciclo ou uma alta sazonalidade que não são compatíveis com o tempo de revisita de um satélite (CARVALHO JÚNIOR, 2018; PEREIRA; ABREU; MAILLARD, 2017; POURSANIDIS *et al.*, 2019). A resolução espacial também é uma limitação a ser considerada: muitos rios possuem o seu leito com menor extensão do que a resolução espacial do sistema sensor (CARVALHO JÚNIOR, 2018; POURSANIDIS *et al.*, 2019). Pode-se citar a série de satélites Landsat 8, que possui uma resolução de 30 m, sendo inviável a aplicação de coleções de imagens Landsat para monitoramento ou estudo de corpos hídricos que apresentem menor extensão.

Dentre as alternativas que vêm sendo utilizadas para os estudos dos corpos hídricos continentais, pesquisadores têm explorado técnicas de altimetria por radar e radar imageador de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar*) para monitorar inundações, uma vez que a cobertura de nuvens não inviabiliza esse tipo de análise, além do dado de radar possibilitar a produção de modelos digitais de elevação (EVANS; COSTA, 2013; PEREIRA; ABREU; MAILLARD, 2017; ZANI *et al.*, 2012). Ainda que seja possível contar com a alternativa de sistemas sensores ativos, imagens orbitais de sistemas sensores passivos multiespectrais são fundamentais para se obterem dados relevantes dos corpos hídricos continentais. Dados gerados por sensores que operam com comprimentos de ondas eletromagnéticas na região do espectro visível e infravermelho ajudam a entender as características do alvo estudado como sedimentos em suspensão, a vegetação aquática e materiais e substâncias optativamente ativas dissolvidas (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019).

Neste sentido, pode-se considerar que as implantações recentes de novos tipos de sistemas sensores, como os nanossatélites multiespectrais, têm grande potencial para aprimorar o papel do sensoriamento remoto no estudo de ambientes lacustres, sobretudo os de alta sazonalidade.

## 2.4 NANOSSATÉLITES

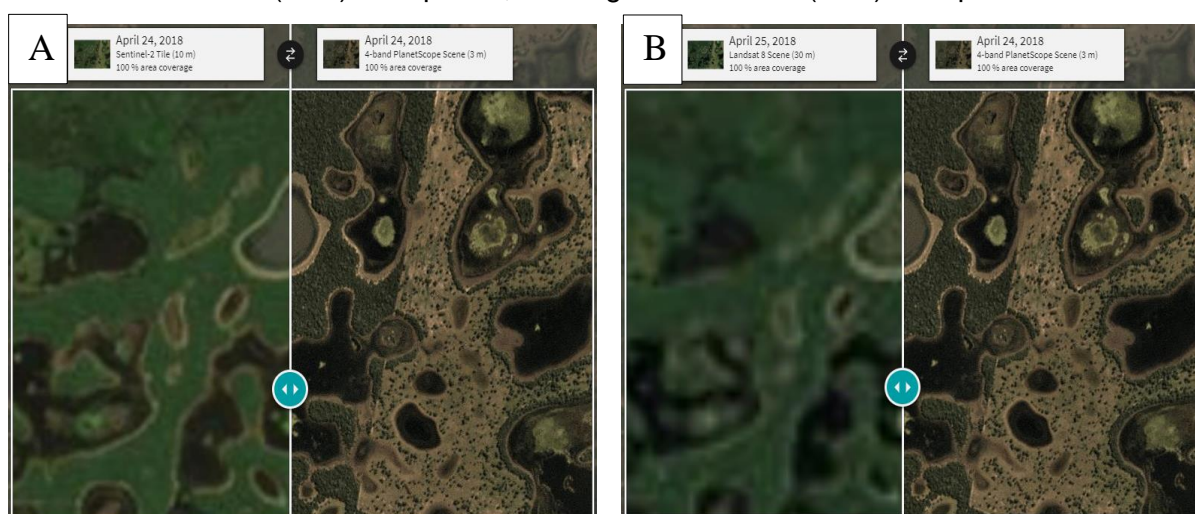
Estudos hídricos recentes têm incorporado e testado o uso de nanossatélites, estes possuem dimensões e peso muito reduzidos em relação aos satélites convencionais tradicionais devido à redução dos seus componentes sensores e eletrônicos (COOLEY *et al.*, 2019; NAGEL *et al.*, 2020). Os nanossatélites são caracterizados por orbitarem em constelações compostas por dezenas de satélites com os mesmos sistemas sensores e, dessa forma, podem superar lacunas de dados espaciais e temporais. Ressalta-se, ainda, que esses satélites também apresentam menores custos de produção quando comparados aos convencionais. Carvalho Júnior (2018) compara o tamanho de um Landsat 8 com um nanossatélite da empresa Planet Labs: o Landsat com suas dimensões e peso de duas toneladas é 50 vezes maior do que um nanossatélite convencional.

A empresa Planet Labs foi a pioneira a colocar em órbita e explorar os nanossatélites, motivada por fins comerciais de monitoramento de propriedades agrícolas. Desde 2016, foi iniciado o lançamento de uma constelação que atualmente é composta por mais de 200 sistemas sensores chamados de *PlanetScope* ou Cubesat 3U, os quais capturam imagens de todo o globo com resolução espacial de três metros e tempo de revisita médio de 30 horas (PLANET LABS, 2016; ROY *et al.*, 2021). Os sensores *PlanetScope* geram produtos multiespectrais nas faixas do R-G-B e NIR, e o uso desses nanossatélites tem sido explorado pela comunidade acadêmica considerando o ganho de informação obtido pelas altas resoluções espaciais e temporais (Figura 3).

Em relação ao estudo e monitoramento dos recursos hídricos, as imagens Planet já foram utilizadas em pesquisas de quantificação de carga e fluxo de sedimentos (STRICK *et al.*, 2019), monitoramento de nível de água (EHRET *et al.*, 2021), qualidade de água após eventos extremos (NIROUMAND-JADIDI *et al.*, 2020), concentração de sedimentos em suspensão em rios intermitentes (PEREIRA *et al.*, 2019), estudos batimétricos em águas rasas (POURSANIDIS *et al.*, 2019) e

monitoramento da dinâmica de inundação de lagoas (COOLEY *et al.*, 2019, 2017). Apesar de ressaltadas algumas dificuldades geradas pelas baixas resoluções espectrais e radiométricas dos nanossatélites, o uso das imagens *PlanetScope* para o desenvolvimento das pesquisas citadas mostrou resultados positivos e relevantes para o entendimento das dinâmicas dos recursos hídricos, principalmente dos eventos de alta sazonalidade.

**Figura 3** - Comparação entre imagens PlanetScope e de sensores tradicionais; A: Imagem Sentinel (10m) a esquerda; B: Imagem Landsat 8 (30m) a esquerda.



Fonte: Elaborado pela autora.

## 2.5 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS EM NUVEM

Além de novas alternativas de sistemas sensores e fontes de dados para estudar a superfície terrestre, a exemplo dos nanossatélites, o processamento de dados espaciais mediante a computação em nuvem também é uma ferramenta recente e que tem ganhado destaque. Uma das principais plataformas de computação em nuvem da atualidade é o GEE do qual, por meio da internet, é possível utilizar recursos como armazenamento e processamento de dados espaciais mediante linhas de comando em *scripts* personalizados (GORELICK *et al.*, 2017). O GEE possui uma biblioteca de *petabytes* de dados, como séries históricas de imagens orbitais das coleções de satélites Landsat e Sentinel e que são atualizadas semanalmente, além de ferramentas pré-estruturadas de processamento de dados. Dentro da plataforma, o usuário controla operações e processos por meio de uma interface de programação

de aplicativos (API) em linguagem *Javascript* (GORELICK *et al.*, 2017; KUMAR; MUTANGA, 2018; PEKEL *et al.*, 2016).

Dentre os maiores impactos da disponibilidade de uma plataforma gratuita como o GEE está a possibilidade de desenvolver estudos em escalas ainda não testadas. Na plataforma, estudos que demandam processamento de alta quantidade de dados são feitos paralelamente em nuvem e supercomputadores externos, sem limitações computacionais de *hardware* do usuário. Para exemplificar o grande potencial de processamento da plataforma do GEE, pode-se citar o trabalho realizado por Pekel *et al.* (2016), no qual foram processadas mais de três milhões de imagens da série de satélites Landsat para quantificar as mudanças globais da água dos últimos 33 anos, ou seja, com resolução espacial de 30 m e temporal de 16 dias, a pesquisa resultou em dados e análises sobre a cobertura de água de toda a superfície terrestre. Todo o processamento levou cerca de 45 dias, algo que, com a quantidade de dados, seria inviável de se concretizar por meios tradicionais, principalmente se considerarmos técnicas de geoprocessamento convencionais como *download* de arquivos e processamento em *softwares* de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Como um dos produtos, foi gerado um mapa, no qual é possível observar o resultado do comportamento hídrico em todas as áreas continentais.

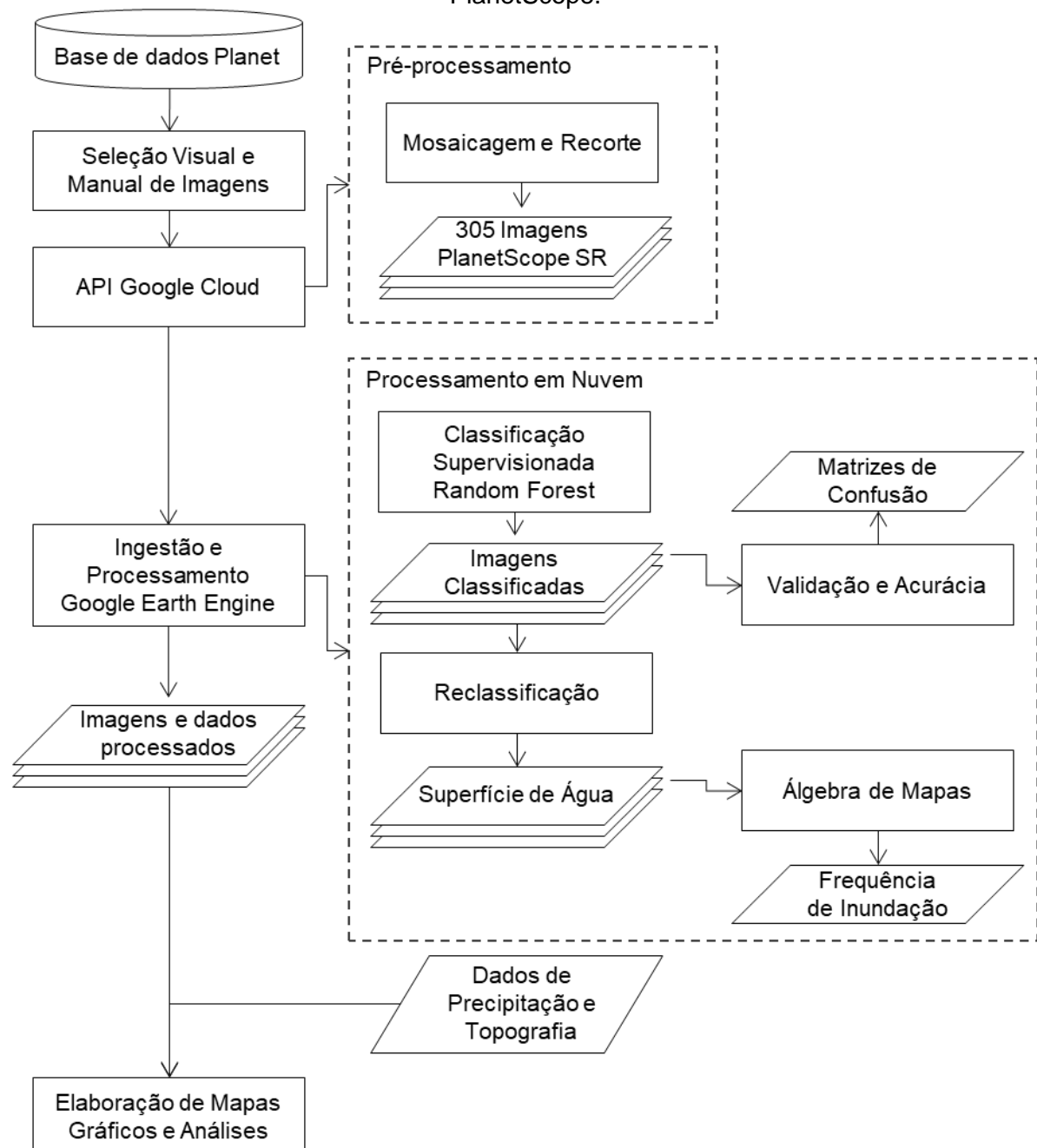
Posteriormente, Pickens *et al.* (2020) desenvolveram o mapa da dinâmica da superfície de água global para o período de 1999 a 2020, baseados na metodologia de Pekel *et al.* (2016), porém com melhores práticas de amostragem e verificação de acurácia, e ainda com foco no detalhamento da dinâmica inter e intra-anual da superfície de água. Este trabalho também gerou como produtos mapas quantitativos e qualitativos da dinâmica hídrica global.

A nível nacional, pode-se citar a coleção 1 do projeto MapBiomás Água, lançado no ano de 2020. O projeto processou a série de imagens Landsat na plataforma do GEE e mapeou a frequência da superfície de água do Brasil desde 1985, utilizando análises de modelo espectral de mistura (MEM) e regras de classificação baseadas em lógica *fuzzy* (MAPBIOMAS, c2022). O produto do MapBiomás Água consiste em dados públicos divulgados em forma de mapa interativo junto a outras iniciativas de monitoramento do uso e cobertura do solo, com destaques e estatísticas divididos pelos biomas brasileiros.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS NO PROJETO

O presente trabalho foi elaborado com base no processamento das imagens *PlanetScope* na plataforma do GEE utilizando ferramentas como classificadores supervisionados e operadores matemáticos em coleções de séries temporais, conforme sintetizado no fluxograma da Figura 4. De acordo com a metodologia proposta segue abaixo a descrição das etapas.

**Figura 4** - Fluxograma dos métodos utilizados para o processamento das imagens PlanetScope.

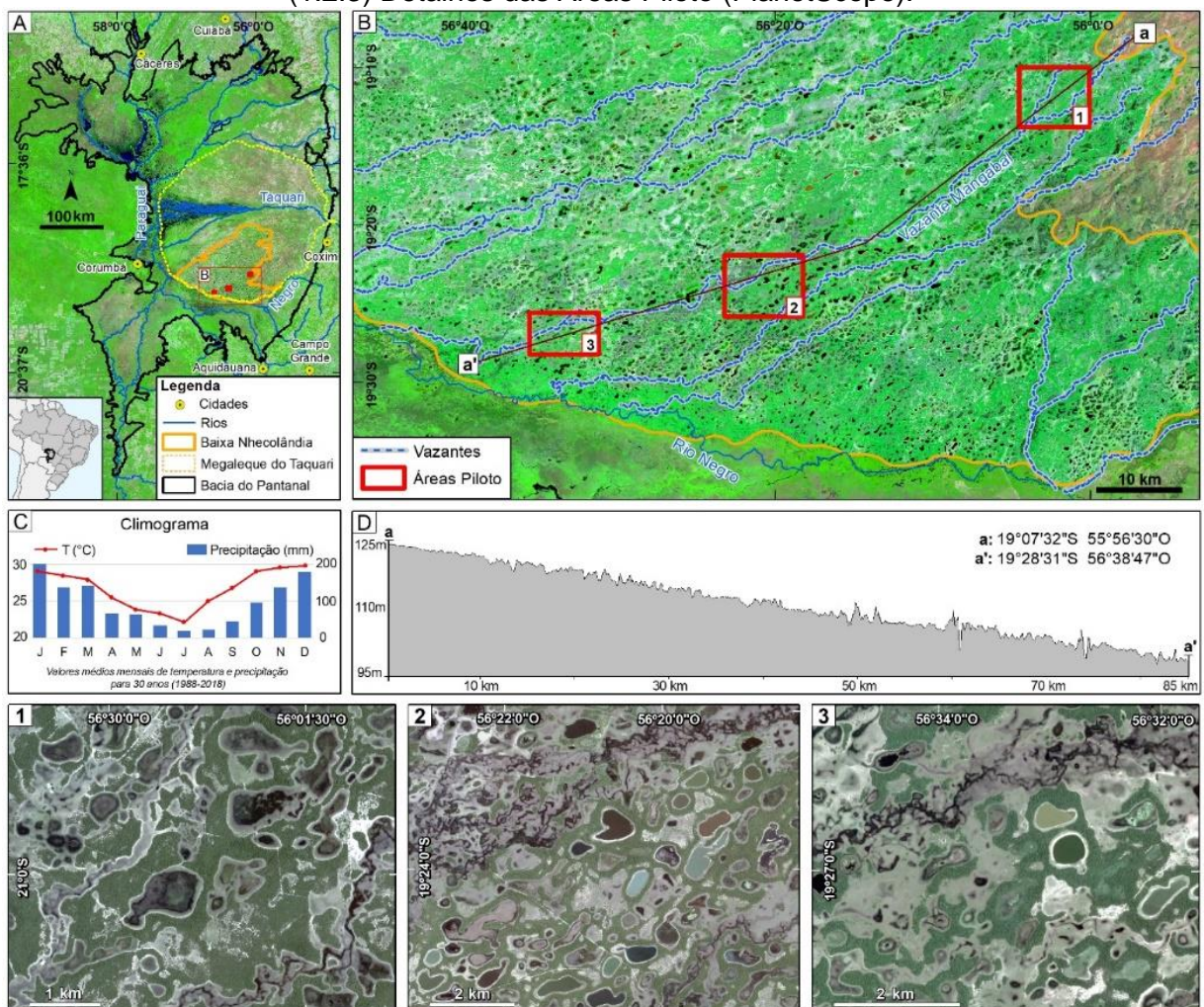


Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO E PERÍODO DE OBSERVAÇÃO

Três áreas piloto foram delimitadas para o desenvolvimento do trabalho, denominadas Áreas 1, 2 e 3, representando diferentes pontos da Nhecolândia (Figura 4). Cada área possui, aproximadamente, 50 km<sup>2</sup>, estando distribuídas ao longo da Vazante do Mangabal. Essa vazante atravessa a região da Nhecolândia na direção nordeste-sudoeste, formada no processo de transbordamento do rio Taquari (ao norte) e responsável pelo escoamento superficial no sentido do rio Negro (ao sul). A série temporal analisada é referente ao período de outubro de 2017 a julho de 2021, considerando a disponibilidade de imagens Planet e os ciclos de inundação da região.

**Figura 5** - Localização da Área de Estudo: (A) Bacia do Pantanal com o Megaleque do Taquari e a Baixa Nhecolândia (Mosaico Landsat 8). (B) Localização das Áreas 1, 2 e 3 (Mosaico Landsat 8). (C) Climograma (CHIRPS). (D) Perfil Topográfico (MERIT-DEM). (1.2.3) Detalhes das Áreas Piloto (PlanetScope).



Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.2 IMAGENS PLANET

Foi estabelecida uma parceria com a empresa *Planet Labs* mediante o programa institucional de incentivo a pesquisa e educação, dessa forma, foi possível ter acesso gratuito às imagens do sensor *PlanetScope* para o desenvolvimento do trabalho. A constelação de mais de 200 nanossatélites carregam o sensor *PlanetScope* de dimensões de 10 x 10 x 30 cm. Esse sistema sensor absorve a reflectância dos alvos no espectro de luz visível. A banda azul (B) opera em uma faixa de 455 a 515 nm, a verde (G) de 500 a 590 nm, e a vermelha (R) de 590 a 670 nm. O sensor também captura informações no comprimento de onda do infravermelho próximo (NIR) de 780 a 860 nm, resultando em imagens de 16 bits de informações radiométricas (PLANET LABS, 2016). As imagens adquiridas na plataforma da empresa correspondem ao nível 3B de pré-processamento. São cenas de 7 x 25 km, com o horário de passada entre 9h30 e 11h30 UTC, já ortorretificadas, com correção atmosférica e resolução espacial de três metros (PLANET LABS, 2016).

Com o acesso à plataforma, foram selecionadas manualmente os ID's de 580 imagens *PlanetScope* que cobriam as áreas pilotos, seguindo os critérios de análise visual de ausência de nuvens e de frequência quinzenal, para formar a série temporal de dados referentes ao período de estudo de outubro de 2017 a julho de 2021.

Após selecionados os ID's de todas as imagens a serem utilizadas, foi realizado um processamento de mosaicagem e recorte por meio de de uma API de integração das plataformas da *Planet* com o *Google Cloud* e o GEE. Nesta etapa, o número de imagens foi reduzido para 305 imagens (Área 1: 103 imagens, Área 2: 102 imagens, Área 3: 100 imagens) de frequência média quinzenal e recortadas de acordo com a dimensão da sua respectiva área piloto, as imagens ainda foram inseridas virtualmente dentro do GEE, formando coleções de imagens multitemporais das Áreas 1, 2 e 3.

O perfil topográfico da área de estudo (Figura 4D) foi elaborado no *software Global Mapper* mediante dados MERIT-DEM (YAMAZAKI *et al.*, 2017), utilizando as imagens *Planet* para a localização da região.

### 3.3 GOOGLE EARTH ENGINE

Todos os processamentos na plataforma de computação em nuvem do Google Earth Engine (GEE) são salvos como *scripts* compostos de dados de entrada, linhas de comando e organização dos dados de saída. Os dados de entrada podem ser correspondentes à biblioteca online disponibilizada na plataforma, tal como os utilizados para a elaboração do climograma da região estudada (Figura 4C), obtidos por meio do modelo CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station*) (FUNK; PETERSON; LANDSFELD, 2015), que utiliza séries históricas de estações pluviométricas e imagens MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) com dados de temperatura. Também com base em dados do modelo CHIRPS, foi gerado um gráfico de precipitação para cada área (Gráficos 1, 2 e 3), sendo os dados referentes ao mesmo período estudado em unidades de mm/pêntada (precipitação acumulada de cinco dias em milímetros).

Os dados de entrada também podem ser inseridos pelo usuário, como foi feito com as imagens *PlanetScope* após serem pré-processadas no *Google Cloud*, as imagens foram carregadas na plataforma como ‘assets’, preservando toda a informação radiométrica dos arquivos *rasters*. Independente da origem do dado, as ferramentas disponibilizadas no GEE são aplicáveis e parametrizáveis.

#### 3.3.1 Classificação Supervisionada

Dentre as ferramentas de processamento de imagens oferecidas pelo GEE, estão os classificadores supervisionados baseados em aprendizado de máquina. Esses classificadores utilizam métodos computacionais para organizar o conhecimento existente sobre o objeto ou área de estudo, usando a inteligência artificial para rotular grandes quantidades de dados de acordo com características pré-definidas (MITCHELL, 1997). No processo de classificação de imagens, um rótulo é atribuído a cada pixel em função das suas características espaciais e espectrais (NOVO, 2008). Na classificação de imagens orbitais ocorre o ‘aprendizado indutivo por exemplos’, esse processamento compreende quatro etapas básicas: amostragem, treinamento de amostras, classificação e validação do processamento com dados independentes (BATISTA, 2003). O classificador supervisionado, conhecido como

*Random Forest* (RF), é um dos principais métodos utilizados ao classificar imagens na plataforma (SHETTY, 2019).

O RF utiliza aprendizado de máquina para retornar dados classificados. A partir de amostras e de seu treinamento, o classificador gera uma quantidade pré-determinada de árvores de decisão com ramos que representam as diferentes características das amostras. Essas características são vistas como variáveis a serem consideradas para associar o dado de entrada a uma classe (LOH, 2011). Na plataforma do GEE, o classificador analisa cada pixel da imagem *Planet* e combina todos os resultados das árvores geradas e, a partir dessa combinação, define a melhor classe a ser atribuída ao pixel com uma decisão chamada de voto máximo (BREIMAN, 2001; SHETTY, 2019). Normalmente, os produtos desse classificador apresentam altos valores de acurácia (BREIMAN, 2001).

Para melhor visualização e inserção de amostras, foram utilizadas as composições coloridas com as bandas R-G-B e NIR-R-G. Quatro classes foram delimitadas para a classificação das imagens *PlanetScope* na região da Nhecolândia: água (classe 1), vazante (classe 2), solo exposto (classe 3, representam porções de solos expostos e bancos de areia bastante comuns na região da Nhecolândia), e cordilheira (classe 4). Para cada classe, foram inseridas 20 regiões de amostras em formato de polígonos, os quais foram salvos como *FeatureCollection* e, em seus metadados, carregavam o respectivo valor de classe. Com as regiões de amostras inseridas manualmente, foi escrito um *script* padrão para aplicar o RF. O classificador utilizou-se da construção de 100 árvores de decisão para definir o voto máximo. As variáveis do *script* foram apenas as regiões de amostras e variáveis espaciais a depender da imagem referente à Área 1, 2 ou 3.

As amostras consistiram em 500 pontos distribuídos randomicamente dentro dos polígonos de amostras, ou regiões de amostras, para cada ponto, sendo considerada a informação radiométrica das quatro bandas da imagem conforme as orientações de Olofsson *et al.* (2014). Do total de amostras, 70% foram destinadas para treinar o classificador, enquanto as 30% restantes foram reservadas para o processo automático de validação. Depois do treinamento de amostras, cada imagem *PlanetScope* resultou em uma imagem classificada de acordo com o RF e em resultados de acurácia da classificação a partir de uma matriz de confusão. O processamento foi o mesmo para todas as imagens carregadas na plataforma, totalizando 305 produtos do classificador: 103, 102 e 100 imagens referente às Áreas

1, 2 e 3, respectivamente. Esses produtos foram convertidos para *assets* e foi criada uma *ImageCollection* de cada área, sendo as coleções de imagens ordenadas cronologicamente.

### 3.3.2 Frequência de Inundação

Com a disposição de imagens inteiras classificadas em pixels de valores únicos 1 (água), 2 (vazante), 3 (solo exposto) ou 4 (cordilheira), foi escrito um segundo *script* para a obtenção do mapa de frequência de inundação baseado em cada *ImageCollection*. Para isso, primeiramente, foi necessário realizar uma álgebra de mapas reclassificando os produtos do RF. Com a ferramenta '*remap*' o valor de cada pixel da pilha de imagens deixou de representar um valor nominal e qualitativo para ser reclassificado, passando a ser um valor quantitativo escalar referente à presença de água. Os novos valores atribuídos foram 1 para todos os pixels classificados inicialmente como 'água', valor 0,5 para os pixels de 'vazante', uma vez que essa classe representava regiões sujeitas a alagamentos sazonais, e valor 0 para as demais classes 'solo exposto' e 'cordilheira' (Quadro 1).

**Quadro 1** - Síntese da reclassificação das imagens com a ferramenta '*remap*'.

Processo de Reclassificação das Imagens		
Valor Qualitativo de Classes		Valor Quantitativo Referente à Presença de Água
Água	1	1
Vazante	2	0,5
Solo Exposto	3	0
Cordilheira	4	0

Fonte: Elaborado pela autora.

Com as coleções de imagens reclassificadas em valores quantitativos, foi utilizado um redutor para obtenção do mapa de frequência de inundação de cada área. Redutores são operadores matemáticos do GEE que operam transversalmente sobre a pilha de imagens, eles fornecem dados estatísticos sobre coleções de imagens, mas também permitem que sejam realizadas operações aritméticas com essas coleções (GOOGLE, 2020). No presente trabalho, foi aplicado um redutor de soma com a ferramenta '*reduce.sum()*', dessa forma, o GEE retornou uma imagem que sintetiza a frequência de inundação de cada área. Essas imagens são compostas por pixels que

podem apresentar valores desde 0 ao número de imagens de cada área (103, 102 ou 100), a depender da soma dos valores de cada pixel ao longo da pilha de imagens reclassificadas. Como exemplo da Área 1, pode-se dizer que regiões de valores 0 correspondem a áreas permanentemente secas, enquanto valores mais próximos de 103 indicam regiões permanentemente alagadas. Com a ferramenta de gráficos ‘*chart*’, foi gerado um gráfico correspondente ao comportamento de cada pilha de imagens reclassificadas em relação à presença de água. A soma dos valores de pixels ‘água’ e ‘vazante’ permitiu trabalhar com os dados de inundação ao longo da série temporal e, inclusive, identificar os ápices de seca e de cheia de cada área.

Todos os produtos foram visualizados no *display* do GEE seguindo parâmetros de visualização pré-determinados ao longo dos diversos *scripts*, foram exportados da plataforma em formato *raster* e o *layout* de cada mapa foi elaborado no *software* ArcGIS 10.5.

## 4 RESULTADOS

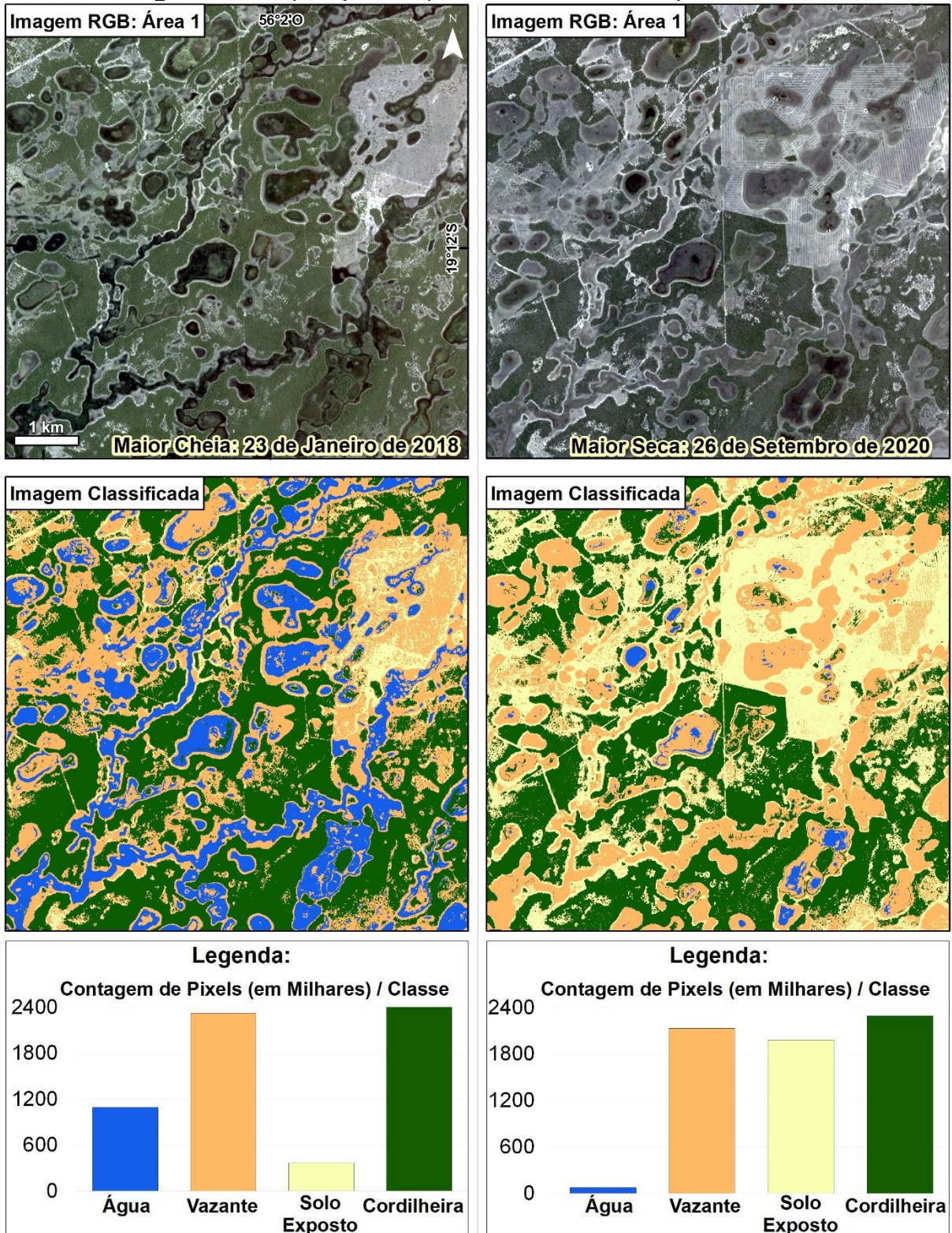
Com base na análise dos produtos do processamento de imagens realizado na plataforma do GEE, foi possível observar as características da dinâmica de inundação da área estudada, bem como as alterações na paisagem a partir do escoamento superficial e, ainda, analisar o ganho de informação que os produtos de nanossatélites proporcionam para estudos de ambientes como a Nhecolândia.

### 4.1 CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA EM IMAGENS PLANETSCOPE

As imagens *PlanetScope* contam com limitações de resolução espectral e operam em uma quantidade reduzida de bandas, contudo o desempenho do classificador excedeu expectativas pela fidelidade da classificação baseada em apenas 4 classes (água, vazante, solo exposto e cordilheira). O algoritmo do classificador avaliou limiares muito próximos de comprimento de onda ao longo das árvores de decisão para definir o rótulo adequado de cada pixel. Apesar disso, os corpos hídricos foram corretamente classificados principalmente devido às informações espectrais da banda quatro, ou infravermelho próximo das imagens. A banda quatro também foi muito expressiva para a delimitação da classe de cordilheiras devido a vegetação arbórea.

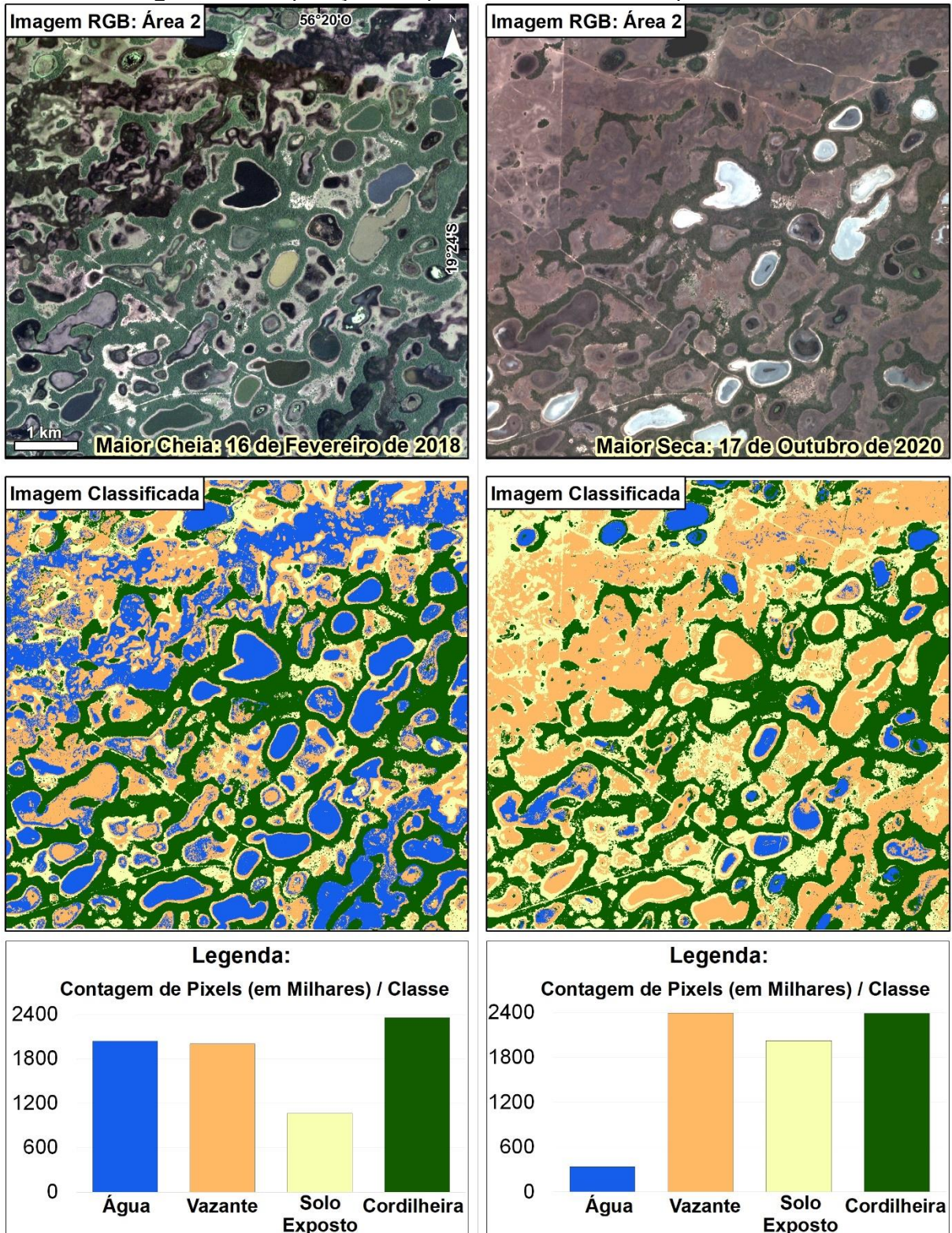
Os produtos dos classificadores das imagens *PlanetScope* podem ser conferidos nas Figuras 6, 7 e 8 com exemplos correspondentes às datas mais secas e mais cheias para cada uma das áreas. A Área 1 (área mais ao norte) apresenta seu pico do ápice de inundação no dia 23 de janeiro de 2018, enquanto o ápice da seca ocorreu no dia 26 de setembro de 2020. Ao observar a Figura 6, fica evidente a grande alteração na paisagem, principalmente no que diz respeito à superfície de água. Da mesma forma, na Área 2, a imagem do dia 16 de fevereiro de 2018 representa a data mais inundada e a imagem do dia 17 de outubro de 2020 representa a paisagem mais seca (Figura 7). Enquanto a Área 3 (área mais ao sul) está mais inundada na imagem do dia 08 de abril de 2018, e mais seca em 04 de abril de 2021 (Figura 8).

**Figura 6 - Comparação do ápice de cheia e de seca para a Área 1.**



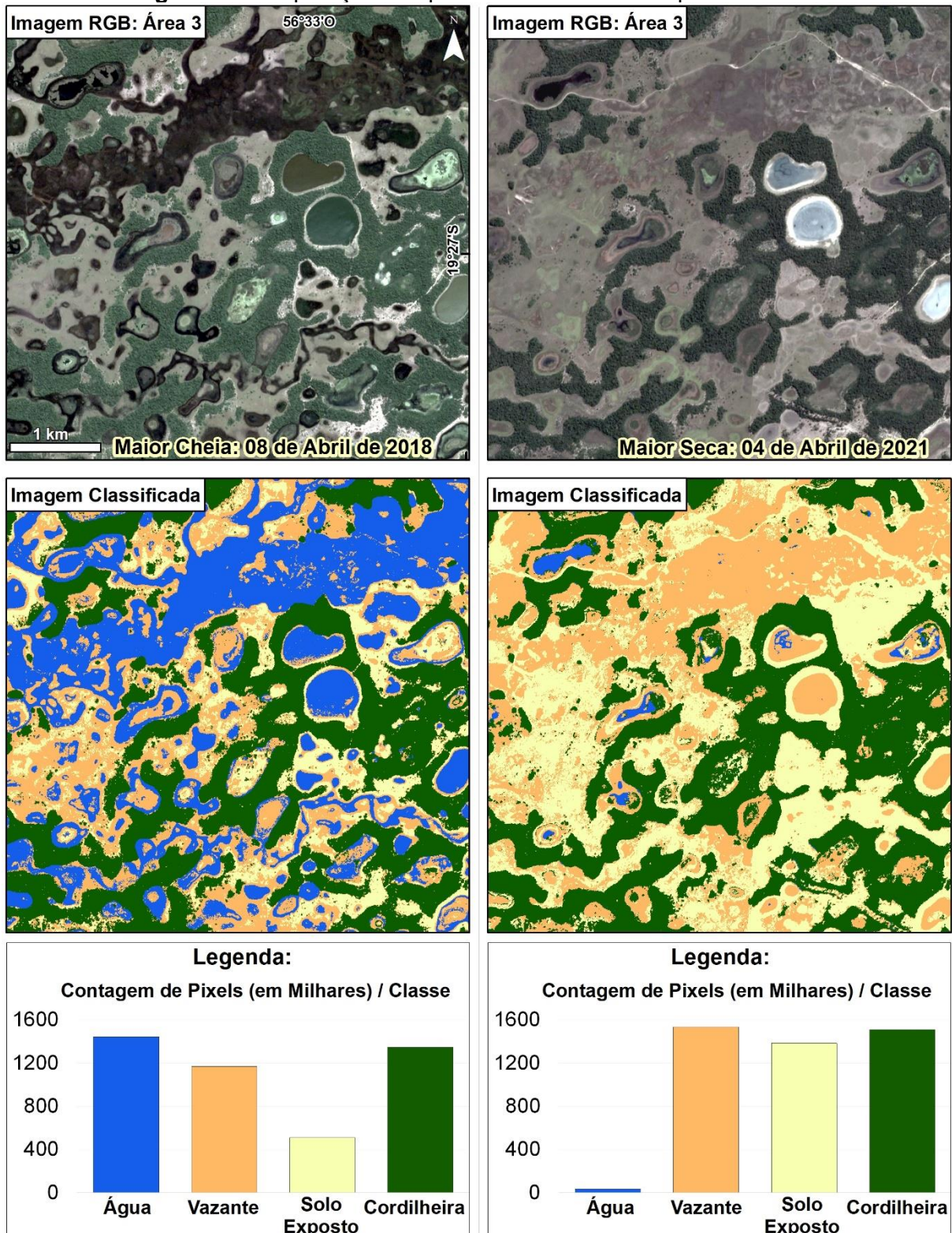
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 7 - Comparação do ápice de cheia e de seca para a Área 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

**Figura 8** - Comparação do ápice de cheia e de seca para a Área 3.



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao analisar as imagens RGB e os produtos do classificador *Random Forests* é possível quantificar espacialmente as alterações de cada classe. Vale ressaltar que os resultados das validações do classificador tiveram valores de acurácia entre 93 e

99% a partir de matrizes de confusão geradas para cada uma das imagens *Planet* (Quadro 2), indicando alta performance do *Random Forests* e possibilitando realizar essa quantificação.

**Quadro 2** - Exemplo de matriz de confusão do produto do classificador *Random Forests* da Área 1 no dia 26 de setembro de 2020.

Área 1 Data: 26/09/2020		Dado de Referência					Acurácia do Usuário (%)
		Água	Vazante	Solo Exposto	Cordilheira	Total	
Dado Classificado	Água	141	0	0	0	141	100
	Vazante	1	145	0	1	147	98,64
	Solo Exposto	0	3	154	0	157	98,09
	Cordilheira	0	0	0	149	149	100
	Total	142	148	154	150	594	Acurácia Global
Acurácia do Produtor (%)		99,30	97,97	100	99,33	Acurácia Global	99,16

Fonte: Elaborado pela autora.

No ápice da seca da Área 1, por exemplo, a contagem de número de pixels classificados como 'água' totalizou 74.395 pixels, enquanto no ápice da inundação esse valor foi de 1.097.232. Como cada pixel das imagens *PlanetScope* representa 9 m<sup>2</sup> da área imageada, pode-se afirmar que, de acordo com o produto dos classificadores, a Área 1 teve um aumento de 9,21 km<sup>2</sup> da superfície de água devido à cheia das lagoas e inundação das vazantes (Quadro 3). O aumento da superfície de água das Áreas 2 e 3 foi de, respectivamente, 15,32 km<sup>2</sup> e 12,65 km<sup>2</sup>.

**Quadro 3** - Cálculo do aumento da superfície de água entre as imagens mais secas e mais inundadas das áreas piloto.

Área Piloto		Nº de pixels 'água'	Área em km <sup>2</sup>	Aumento em km <sup>2</sup>
Área 1	Seca	74.395	0,67	9,21
	Cheia	1.097.232	9,88	
Área 2	Seca	336.688	3,03	15,32
	Cheia	2.039.369	18,35	
Área 3	Seca	37.310	0,34	12,65
	Cheia	1.442.313	12,98	

Fonte: Elaborado pela autora.

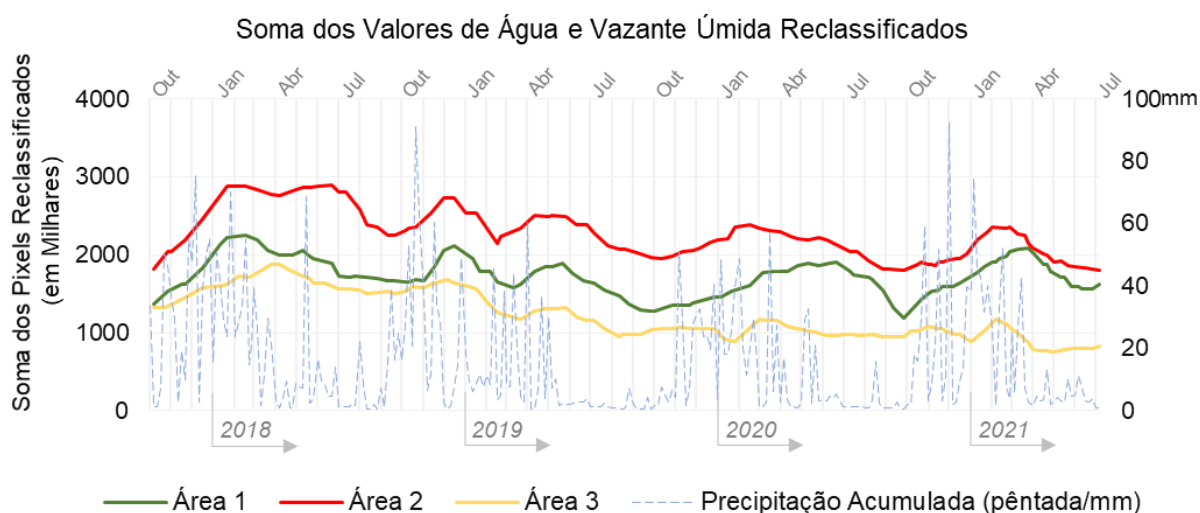
A diferença na presença da superfície de água entre o período mais seco e o mais inundado representa uma significativa alteração na paisagem de cada área piloto. Considerando que cada uma das áreas possui, aproximadamente, 50 km<sup>2</sup>,

pode-se afirmar que há uma alteração média de 20% da cobertura do solo apenas em função da dinâmica de inundação da região.

## 4.2 DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA INUNDAÇÃO DA REGIÃO DA NHECOLÂNDIA

As datas que representam ápices de inundação ou de seca, além de apresentarem quantitativamente pixels com base na presença de água, são situados temporalmente. O produto de todas as imagens classificadas pode ser analisado ao longo da série temporal, dessa forma é possível tecer relações com as características das pilhas de imagens e com dados externos como de precipitação e topografia. Considerando a soma dos valores de água e vazante reclassificados ao longo da pilha de imagens foi elaborado o Gráfico 4, assim como o gráfico de precipitação acumulada do sensor CHIRPS no eixo secundário.

**Gráfico 1** - Comparação dos valores referentes à inundação ao longo da série temporal para as três áreas: (eixo principal) soma dos valores de água e vazante úmida reclassificados ao longo das pilhas de imagens das Áreas 1, 2 e 3. (eixo secundário) precipitação acumulada na área em pântada/mm com dados CHIRPS.



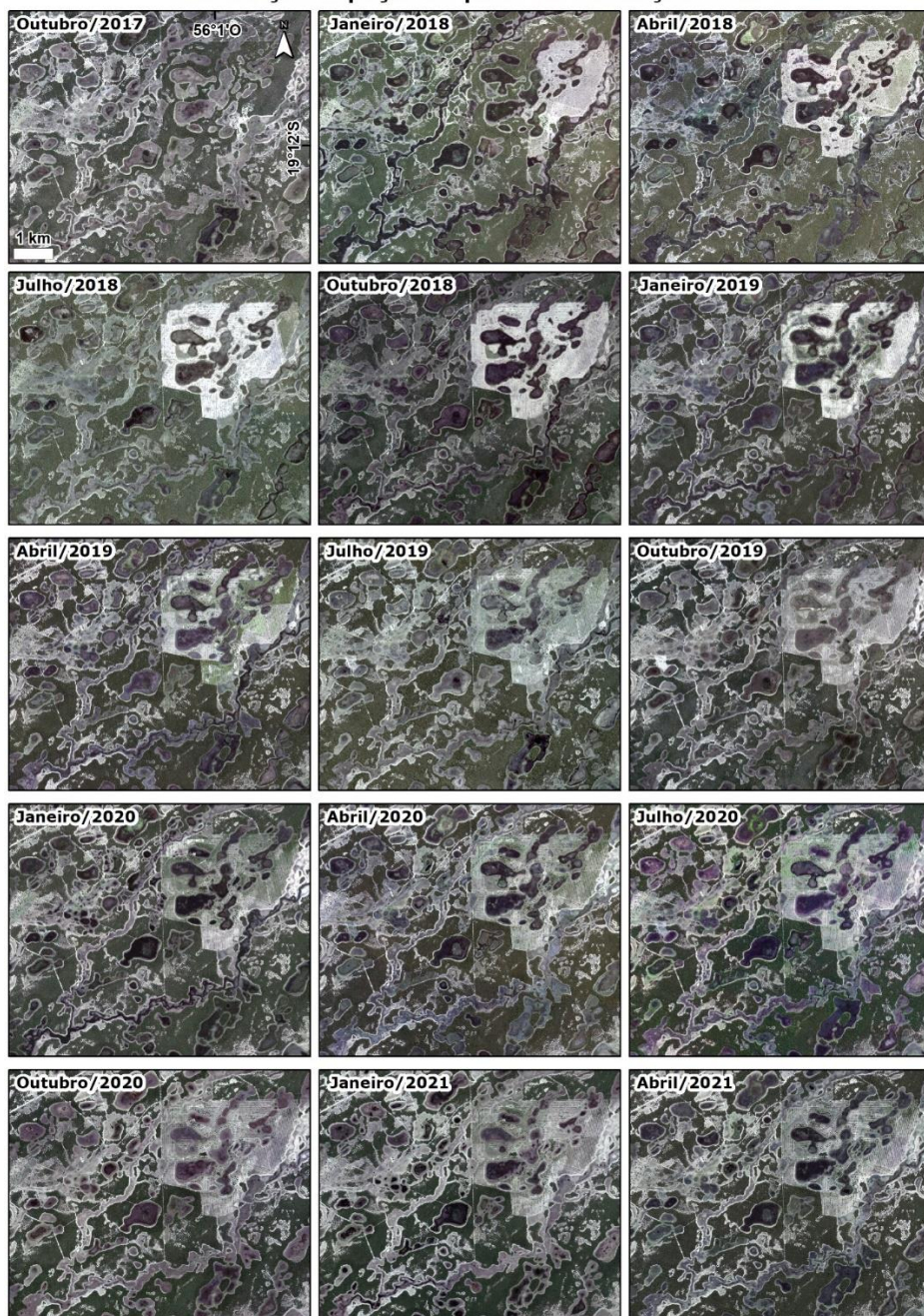
Fonte: Elaborado pela autora.

A Área 1, por vezes, apresentou um comportamento singular na soma dos valores de água e vazante úmida devido a uma área equivalente a 800 hectares que, durante o período de estudo, teve a vegetação nativa convertida para a agricultura. Essa alteração no uso e cobertura da terra implicou em uma classificação oscilante da área ao longo da série temporal entre as classes de solo exposto, vazante e

cordilheira, a depender das condições de irrigação e rotação da cultura plantada. Apesar dessa alteração inesperada, a análise integrada das imagens *PlanetScope* classificadas e em composição RGB permitiu a compreensão do contexto e dinâmica da inundação da área.

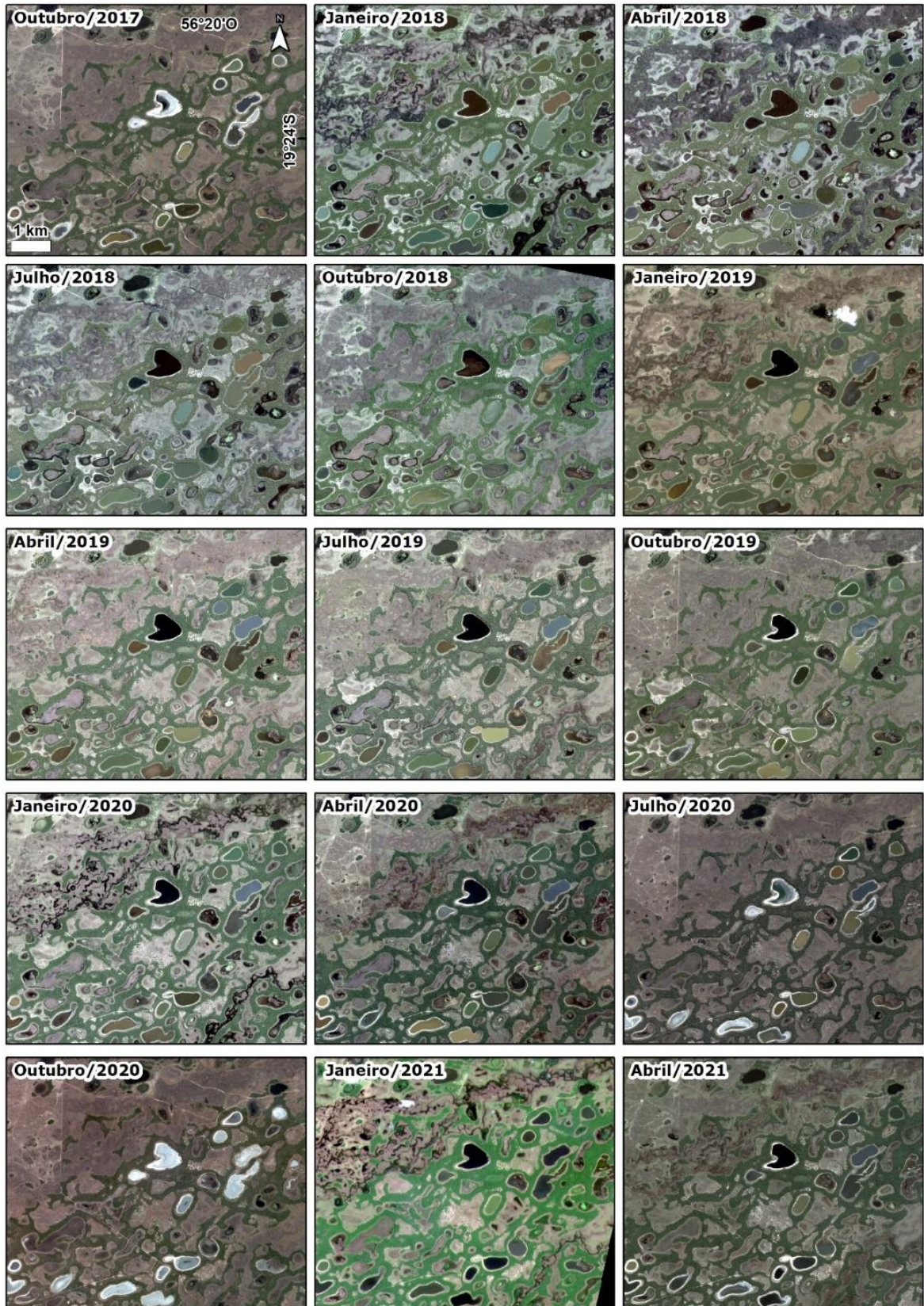
O comportamento da distribuição espaço-temporal da inundação de cada área piloto foi sintetizado em imagens trimestrais e organizado em *layouts* compostos por imagens RGB, respectivamente, nas Figuras 9, 10 e 11.

**Figura 9** - Mosaico de imagens PlanetScope RGB da Área 1 para o período observado.  
**Distribuição Espaço-Temporal da Inundação: Área 1**



Fonte: Elaborado pela autora.

**Figura 10 - Mosaico de imagens PlanetScope RGB da Área 2 para o período observado.  
Distribuição Espaço-Temporal da Inundação: Área 2**



Fonte: Elaborado pela autora.

**Figura 11 - Mosaico de imagens PlanetScope RGB da Área 3 para o período observado.  
Distribuição Espaço-Temporal da Inundação: Área 3**



Fonte: Elaborado pela autora.

Com base na análise dos resultados, percebe-se que, no início de outubro de 2017, as três áreas apresentaram água concentrada apenas nas lagoas, o limite entre

a faixa das cordilheiras e das vazantes deixou em evidência a área de alagamento. Apesar de outubro ser o mês de início da estação chuvosa, com base em dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (c2020), observou-se que, para ano de 2017, chuvas de acima de cinco mm foram observadas somente a partir do dia 21. As primeiras imagens do período de estudo representam, portanto, o resultado de uma sequência de meses com baixos valores de precipitação, causando o grande avanço da faixa de areia ao redor de algumas lagoas, especialmente na Área 2.

A partir do mês de novembro de 2017, as três áreas apresentaram um padrão crescente da superfície de água mapeada e observada, esse processo está diretamente associado ao período de chuvas com registros de mais de 40 mm/pêntada. Nas vazantes, é observada a formação inicial de canais de escoamento mais estreitos e profundos, enquanto as lagoas vão aumentando a superfície de água. Após iniciado o fluxo de água das vazantes, a paisagem sofreu grandes alterações ao longo dos meses de cheia, o aumento gradativo da superfície de água faz com que as vazantes inuntem em quase toda a área de drenagem, elas se conectaram com as baías e se tornaram canais de água delimitados pela vegetação. A Área 1 apresenta esse evento de forma mais expressiva em regiões de lagoas de água doce, que transbordam e se conectam, formando superfícies de água contínuas. Também as lagoas salino-alcálinas, que normalmente são isoladas do escoamento superficial, diminuiram significativamente a área da faixa de areia circundante até o ápice da cheia.

O primeiro evento de cheia dentro do período observado ocorreu em janeiro, fevereiro e abril de 2018 para as áreas 1, 2 e 3, respectivamente. Vale ressaltar, conforme evidenciado pelo Gráfico 1, que desde 2018 não houve eventos de cheia iguais ou mais expressivos nos anos posteriores, dessa forma, todas as áreas pilotos apresentaram o ápice da cheia ainda no primeiro semestre de 2018. Após a passagem do pulso de inundação, cada uma das áreas piloto passou a apresentar perda gradativa da superfície de água, acompanhada pelo período de chuvas menos intensas, da ordem de dez mm acumulados a cada cinco dias, até o mês de outubro, quando se iniciou novamente a estação chuvosa. Nesse intervalo, a área de escoamento voltou a apresentar solo exposto arenoso e as vazantes perderam toda a superfície de água, inclusive dos canais mais profundos e estreitos. Além da redução da superfície de água das lagoas, é possível observar o aumento da cobertura de

macrófitas nas lagoas de água doce durante o período de estiagem, com destaque para a Área 1.

O segundo pico de cheia ocorreu no mês de dezembro de 2018 para as três áreas, especialmente após registros de precipitação acumulada de 90 mm em cinco dias. O período posterior referente ao primeiro semestre de 2019 apresentou variação na paisagem e nos valores de água e vazante úmida mapeados apenas na área das vazantes, com canais estreitos de superfície de água. Isso se deve à estabilidade da superfície de água encontrada nas lagoas como resultado de precipitações regulares que ocorreram no período. Dentre as áreas piloto, a Área 3 é a menos expressiva em relação ao número de lagoas e, por isso, é a que apresenta variações mais significativas no mapeamento da inundação, com tendência decrescente.

O segundo semestre de 2019 foi marcado pelo maior período de estiagem observado, as três áreas piloto apresentaram superfície de água apenas na área das lagoas em uma tendência de queda até o mês de outubro, com o início de mais uma estação chuvosa. As precipitações que ocorreram até abril de 2020 foram as menores registradas, implicando em um terceiro evento de cheia ainda menos expressivo, ocorrido em fevereiro de 2020 nas Áreas 1 e 2, e em março de 2020 na Área 3. As lagoas e vazantes voltaram a secar ao longo do segundo semestre de 2020, ainda impactadas pelo fraco ano hidrológico anterior; grande parte das lagoas das Áreas 1 e 2 secaram completamente até o início da estação chuvosa no mês outubro, resultando no mapeamento e paisagem de ápice da seca para essas áreas.

A partir das chuvas significativas iniciadas em outubro de 2020, as lagoas recuperaram rapidamente a sua superfície de água até o mês de janeiro de 2021; as vazantes começaram a formar novamente os canais de escoamento e o último evento de cheia mapeado, tanto das lagoas quanto das vazantes, manifestou-se nos meses de fevereiro e março de 2021. Logo em seguida, a evaporação das lagoas e seca das vazantes foi acentuada pela queda das chuvas somada ao escoamento posterior à passagem do pulso de inundação. As últimas imagens *PlanetScope* analisadas para as áreas piloto, todas referentes ao dia 07 de julho de 2021, apresentaram uma paisagem típica do período de seca: ausência de superfície de água na área das vazantes e alta evaporação da água das lagoas.

As três áreas apresentaram, de forma assíncrona, a mesma dinâmica de inundação: 1) inicialmente com muitas lagoas secas; 2) aumento da superfície de água das lagoas e presença de água em canais mais estreitos e profundos dentro das

vazantes; 3) ápice de cheia das lagoas, algumas conectadas pela área de vazante completamente inundada; 4) escoamento da água das vazantes e retenção de água em lagoas isoladas. Esse ciclo de inundação, entretanto, dá-se de maneira heterogênea entre as áreas piloto, assim como ocorre em escala regional da Bacia do Pantanal.

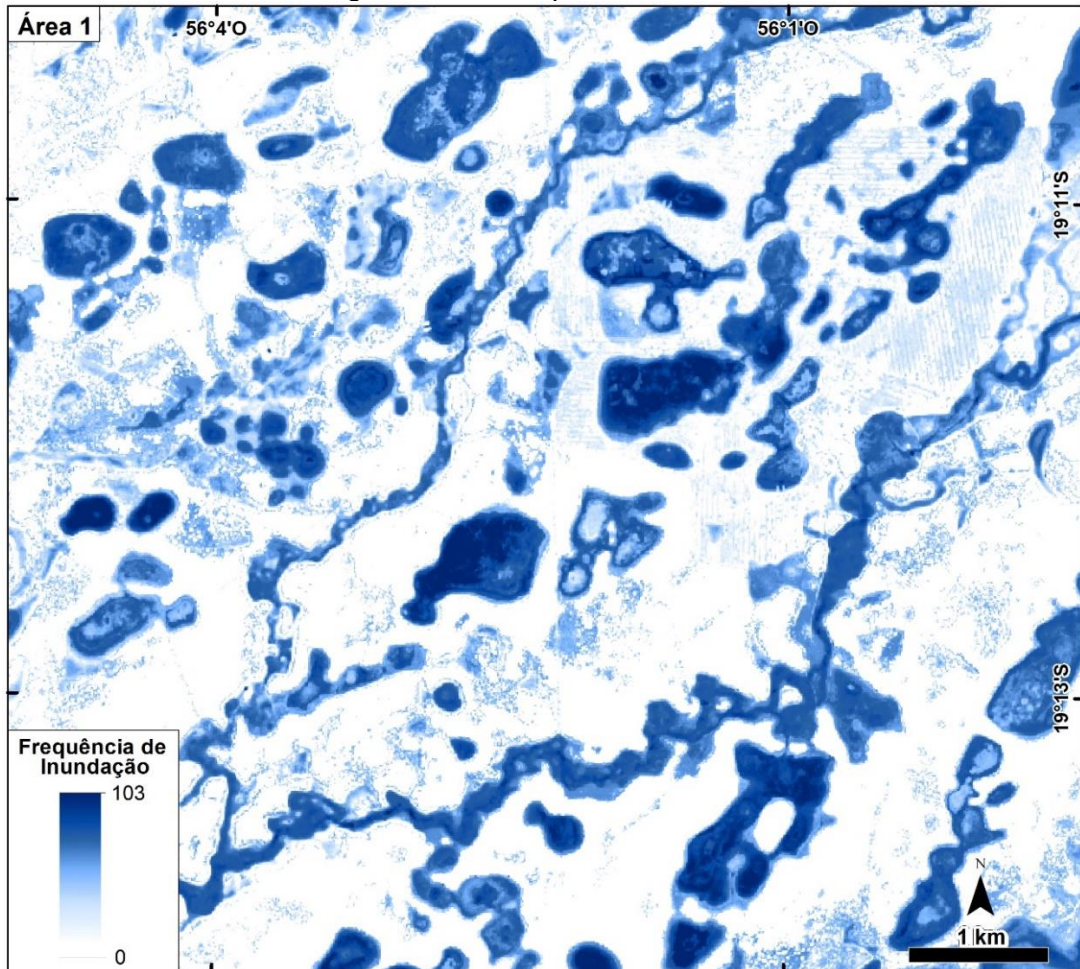
#### 4.3 FREQUÊNCIA DA INUNDAÇÃO DA REGIÃO DA NHECOLÂNDIA

A frequência de inundação de cada área e suas respectivas precipitações são apresentadas nas Figuras 12, 13 e 14 e Gráficos 2, 3 e 4 (áreas 1, 2 e 3, respectivamente). Cada imagem evidencia, em tons de azul escuro, a presença de valores correspondentes à água e/ou vazantes úmidas ao longo do período estudado. Essas imagens são compostas por pixels que podem apresentar valores desde 0 ao número de imagens de cada área (103, 102 ou 100), com intervalos de 0,5, a depender da soma dos valores de cada pixel por meio da pilha de imagens reclassificadas. Isto é, pixels mais próximos de 0 (branco) correspondem a áreas permanentemente secas, enquanto valores mais próximos de 100 (azul escuro) indicam regiões permanentemente alagadas. Cada gráfico é resultante da soma dos valores reclassificados ao longo da pilha de imagens, assim como o gráfico de precipitação acumulada do sensor CHIRPS no eixo secundário.

É possível observar que a área mais central das lagoas apresenta os maiores valores de frequência da superfície de água, enquanto as bordas ou a área de praia apresentaram valores 1 ou 0,5 em menores quantidades, com tons mais claros de azul ressaltando a expansão/contração ao longo das estações. A presença de macrófitas aquáticas no interior das lagoas também imprime seu registro em manchas de tons mais claros pois, devido às características espectrais de reflectância da vegetação, por vezes, esse tipo de vegetação se misturou com a vegetação das cordilheiras.

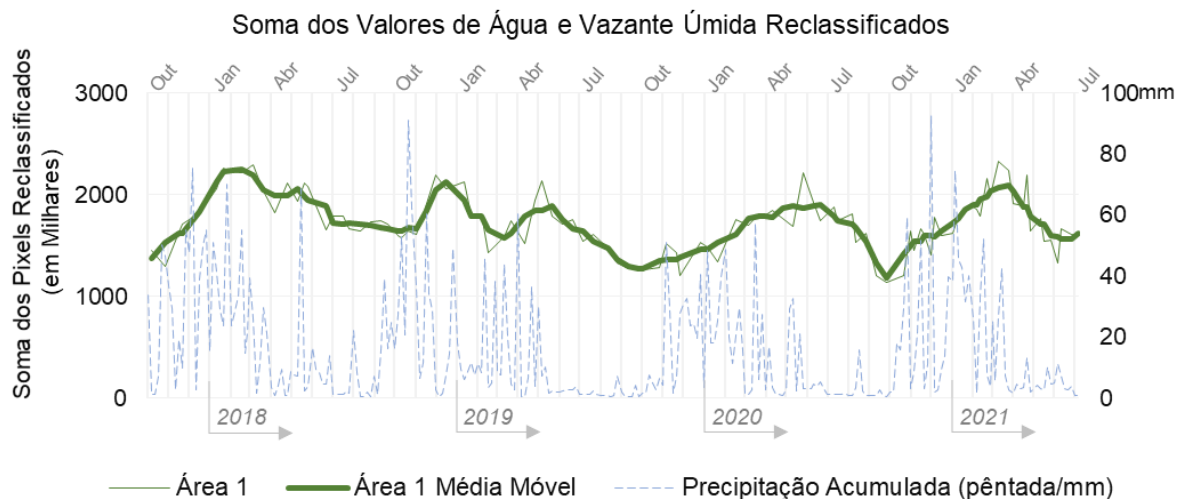
As vazantes, por mais que apresentem majoritariamente valores médios em relação à presença de água, normalmente na ordem de 50 a 60, dentro da escala de frequência de inundação, possuem canais estreitos relacionados às áreas que mais apresentam superfície de água. Esses pequenos canais são mais profundos e possuem valores maiores dentro das vazantes, pois acumulam água e são os últimos lugares a secarem após a passagem do pulso de inundação.

**Figura 12** - Mapa de frequência de inundação da Área 1 a partir do processamento de 103 imagens PlanetScope reclassificadas.



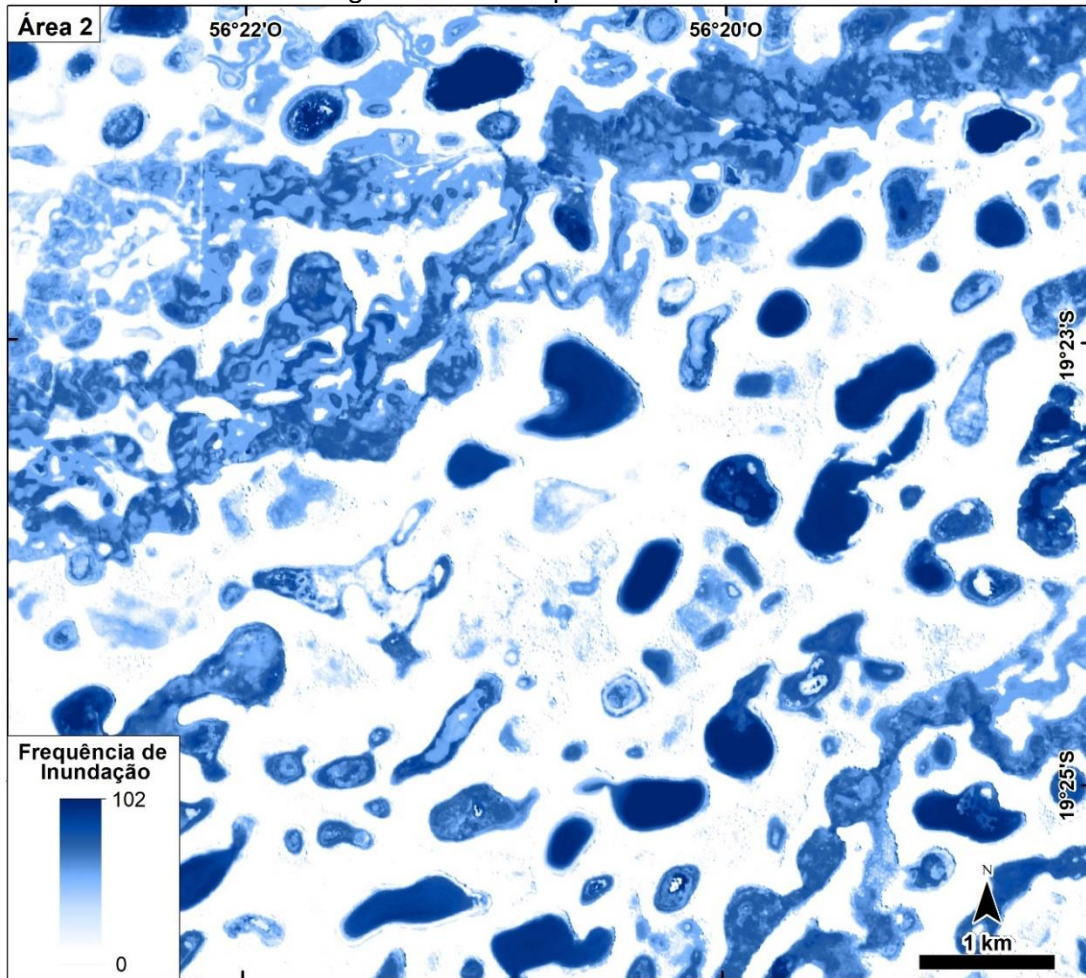
Fonte: Elaborado pela autora.

**Gráfico 2** - Soma dos Valores de Água e Vazante Úmida Reclassificados referentes à Área 1. (eixo principal) soma dos valores de água e vazante úmida reclassificados ao longo da pilha de imagens PlanetScope da Área 1, (eixo secundário) precipitação acumulada na área em pântada/mm com dados CHIRPS; Ápice da cheia: 23/01/2018; Ápice da seca: 26/09/2020.



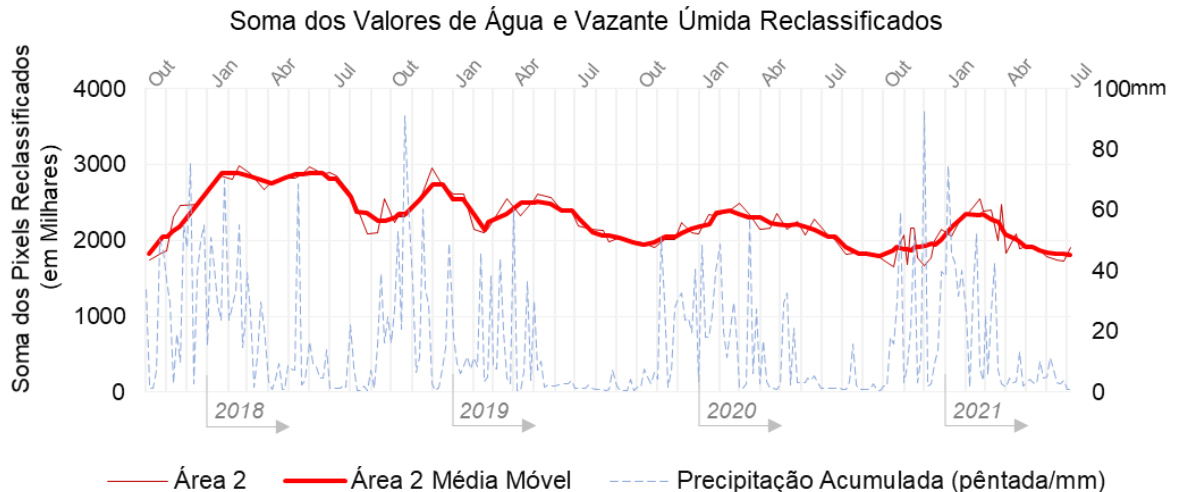
Fonte: Elaborado pela autora.

**Figura 13** - Mapa de frequência de inundação da Área 2 a partir do processamento de 102 imagens PlanetScope reclassificadas.



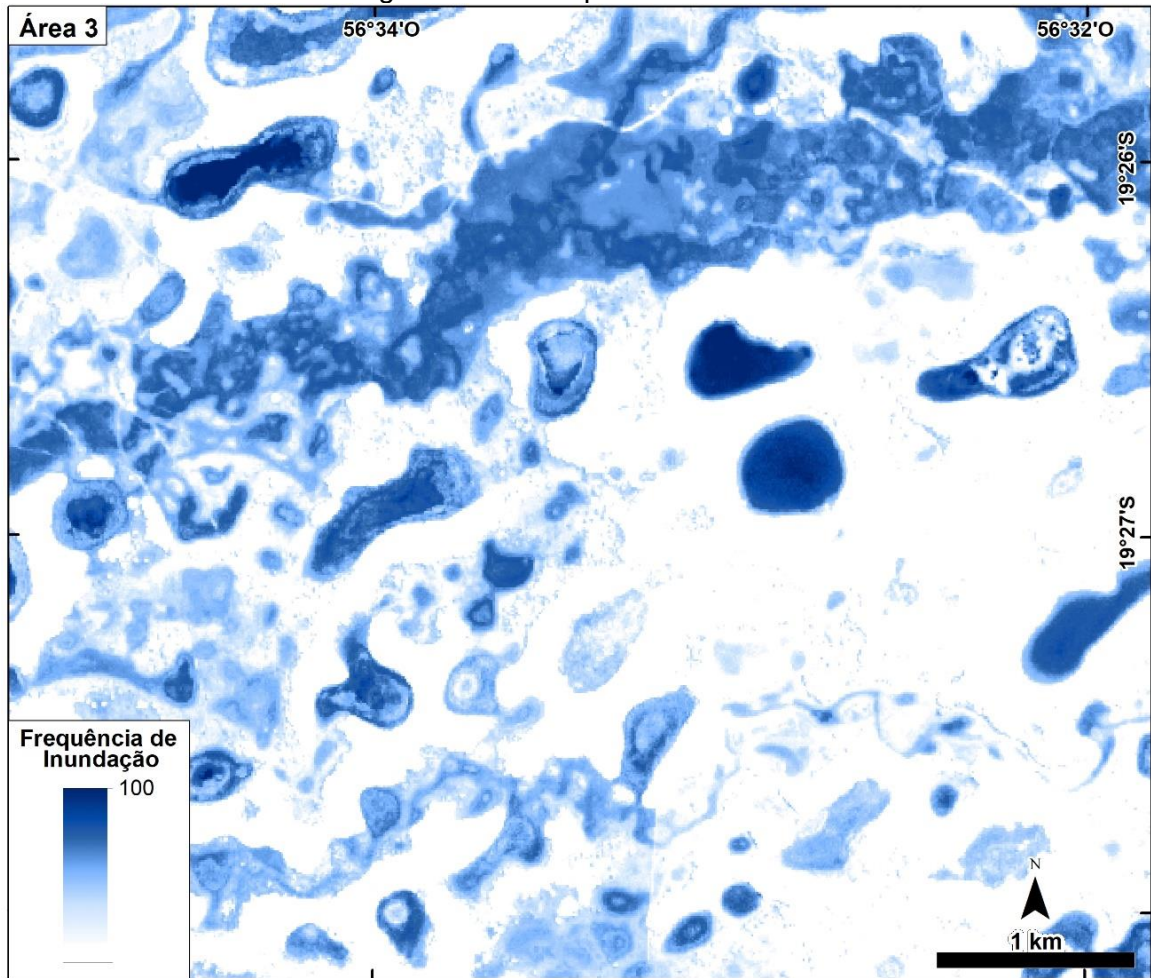
Fonte: Elaborado pela autora.

**Gráfico 3** - Soma dos Valores de Água e Vazante Úmida Reclassificados referentes à Área 2. (eixo principal) soma dos valores de água e vazante úmida reclassificados ao longo da pilha de imagens PlanetScope da Área 2, (eixo secundário) precipitação acumulada na área em pântada/mm com dados CHIRPS; Ápice da cheia: 16/02/2018; Ápice da seca: 17/10/2020.



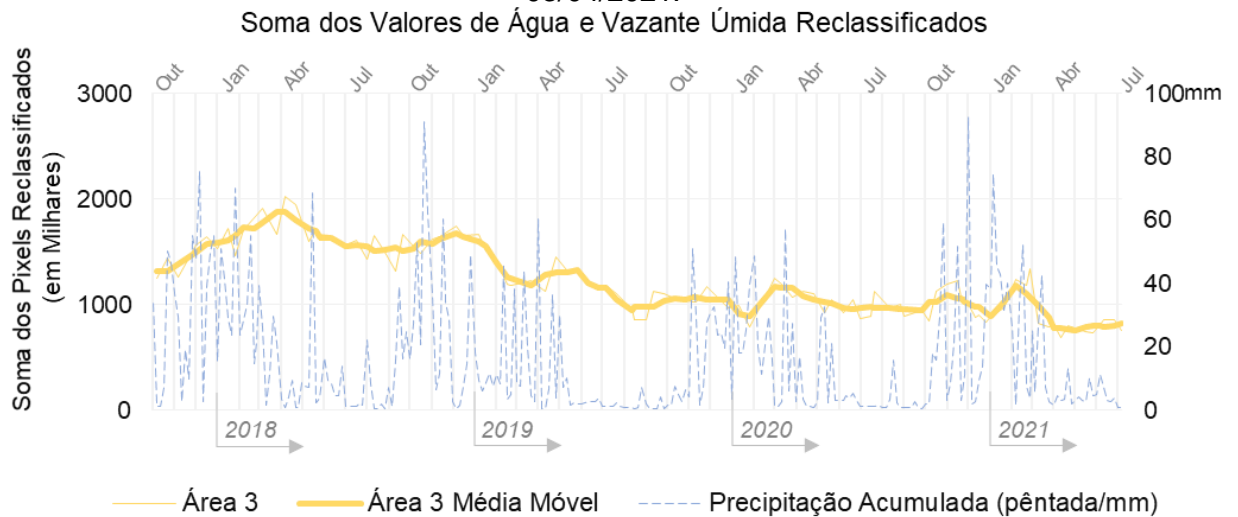
Fonte: Elaborado pela autora.

**Figura 14** - Mapa de frequência de inundação da Área 3 a partir do processamento de 100 imagens PlanetScope reclassificadas.



Fonte: Elaborado pela autora.

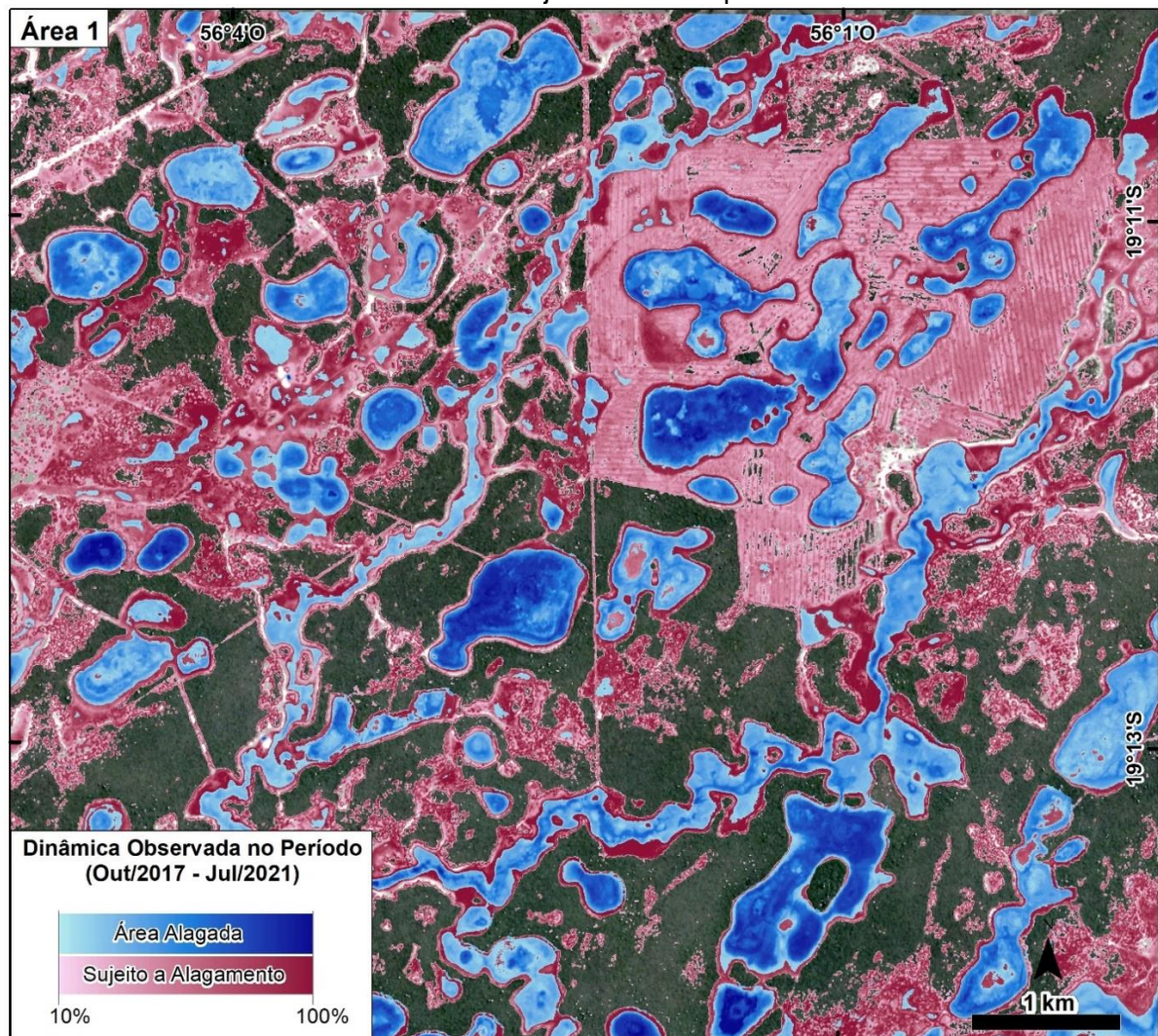
**Gráfico 4** - Soma dos Valores de Água e Vazante Úmida Reclassificados referentes à Área 3. (eixo principal) soma dos valores de água e vazante úmida reclassificados ao longo da pilha de imagens PlanetScope da Área 2, (eixo secundário) precipitação acumulada na área em pântada/mm com dados CHIRPS; Ápice da cheia: 08/04/2018; Ápice da seca: 03/04/2021.



Fonte: Elaborado pela autora.

A frequência dos valores de água e vazante úmida mapeados também pode ser estratificada. As áreas classificadas apenas como vazante úmida ao longo da série temporal podem ser consideradas as áreas sujeitas a alagamentos visto que, apesar de não apresentarem a superfície de água, participam do escoamento da inundação em subsuperfície, registrando sinal espectral característico de solo úmido, especialmente nos comprimentos de onda da banda do infravermelho próximo (NIR). As áreas que apresentaram a classe de água, por sua vez, podem ser consideradas áreas alagadas durante o período observado, que correspondem às lagoas e aos canais das vazantes esporadicamente alagados, conforme sintetizado nas Figuras 15, 16 e 17.

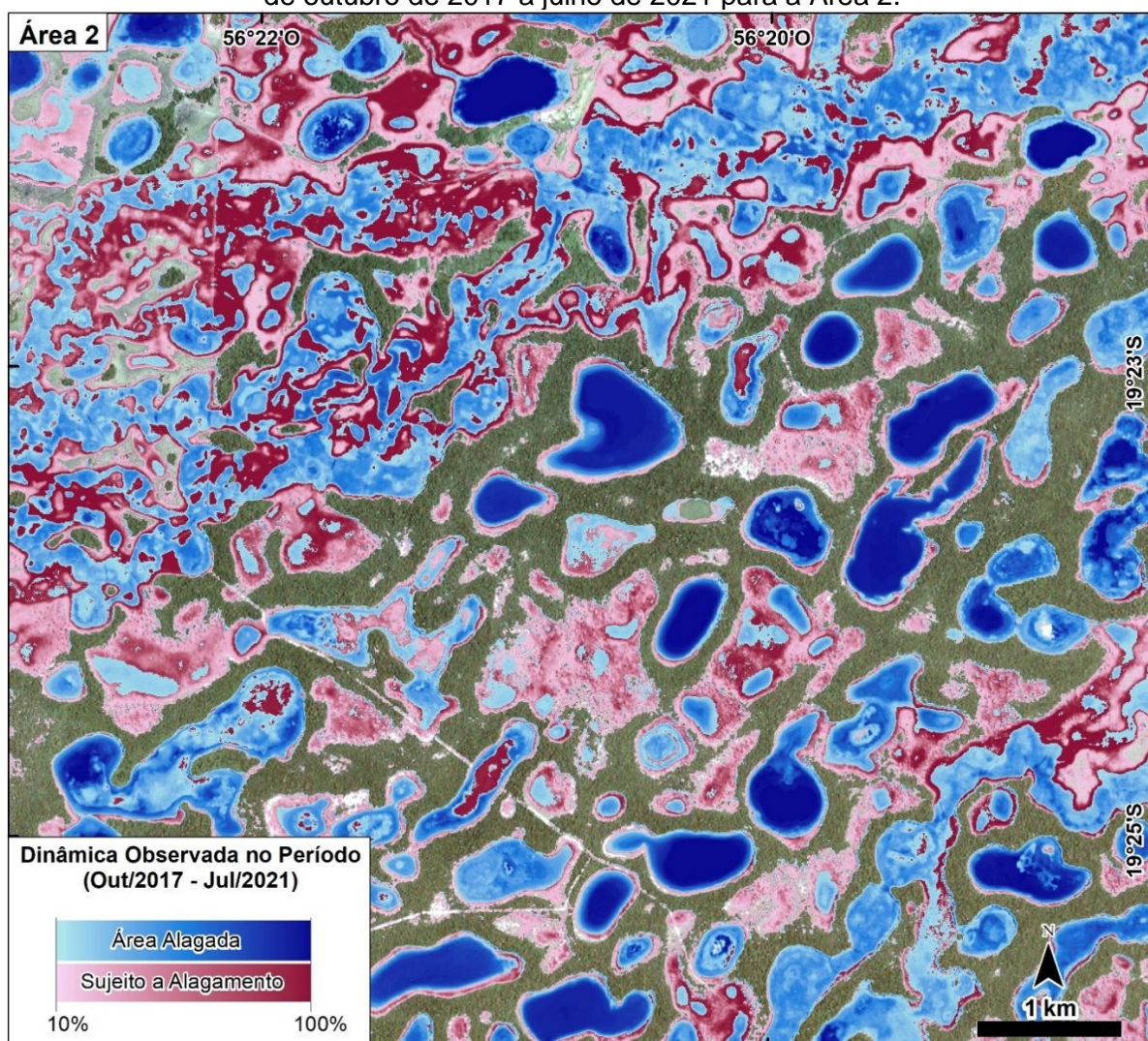
**Figura 15** - Dinâmica de áreas alagadas e sujeitas a alagamentos observadas no período de outubro de 2017 a julho de 2021 para a Área 1.



Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que as maiores frequências das áreas sujeitas a alagamentos estão diretamente associadas às regiões de formação dos canais de água no escoamento superficial e ao transbordamento das lagoas. Enquanto as menores frequências, que também são as áreas mais distantes das lagoas e da superfície de água mapeada, podem estar mais associadas à presença de umidade do solo, devido à precipitação local.

**Figura 16** - Dinâmica de áreas alagadas e sujeitas a alagamentos observadas no período de outubro de 2017 a julho de 2021 para a Área 2.

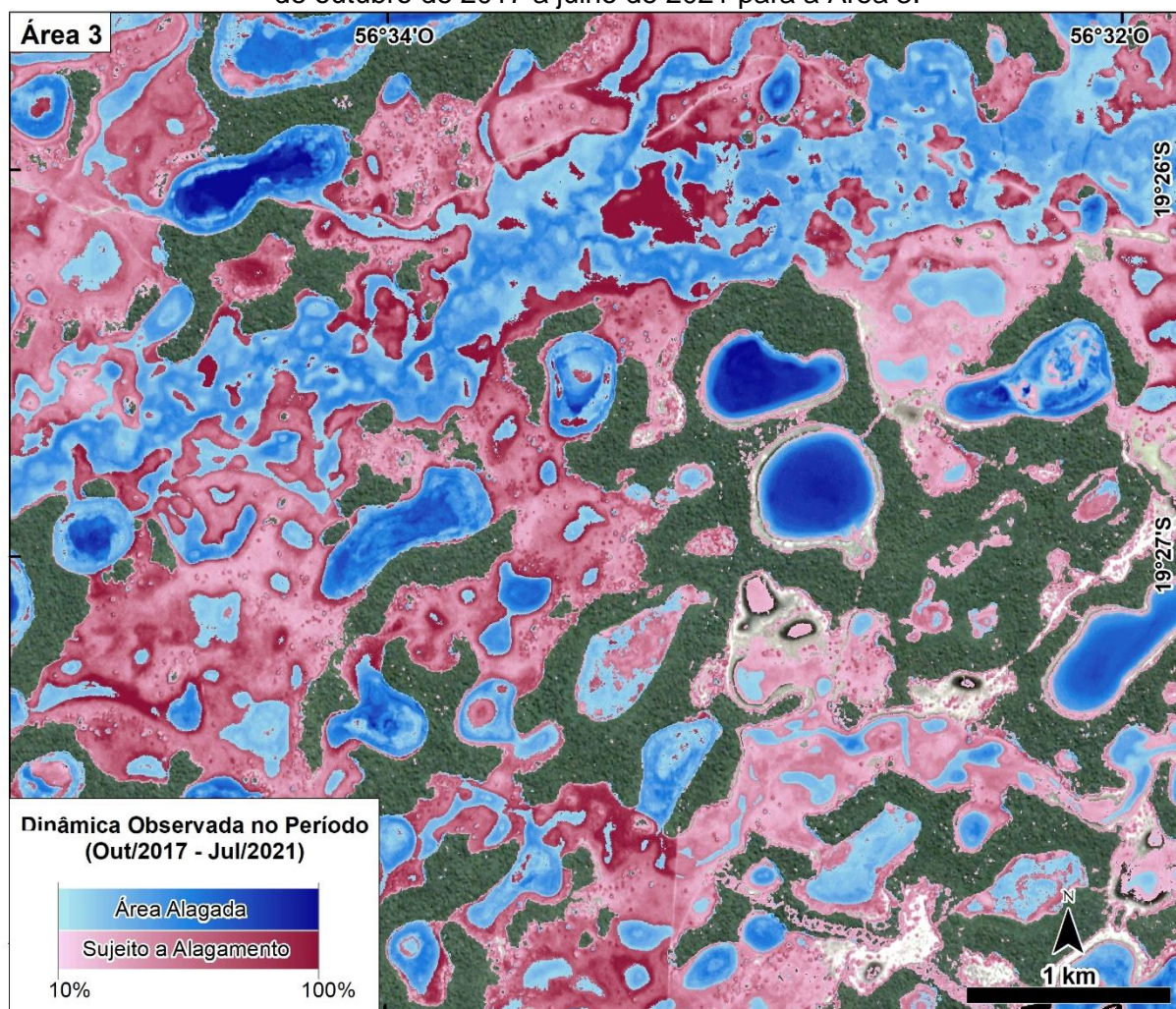


Fonte: Elaborado pela autora.

Em síntese, para o período de outubro de 2017 a julho de 2021, observou-se que a cheia das lagoas isoladas está diretamente relacionada ao regime de chuvas e à evaporação. Os eventos de cheia das vazantes, além das taxas de precipitações locais, são condicionados pelo escoamento superficial do pulso de inundação da

Vazante do Mangabal, responsável por transportar o transbordamento do rio Taquari e o excedente das cheias das lagoas, principalmente das lagoas de água doce que não são isoladas pelas cordilheiras. Verificou-se, também, que a dinâmica hidrológica e as alterações na paisagem da Nhecolândia são altamente sazonais, de modo que, para o ápice da cheia até uma perda total da superfície da água, tanto da vazante quanto das lagoas, há um intervalo máximo de três meses. Conforme evidenciado pelo Gráfico 1, o ciclo do pulso de inundação entre as Áreas 1 e 3 possui uma diferença média de dois meses para a cheia da vazante se manifestar entre a área mais ao norte e a área mais ao sul, o que corresponde a uma extensão de 85 km e uma diferença de altitude de 25 m variando entre 100 e 125 m (Figura 4D).

**Figura 17** - Dinâmica de áreas alagadas e sujeitas a alagamentos observadas no período de outubro de 2017 a julho de 2021 para a Área 3.



Fonte: Elaborado pela autora.

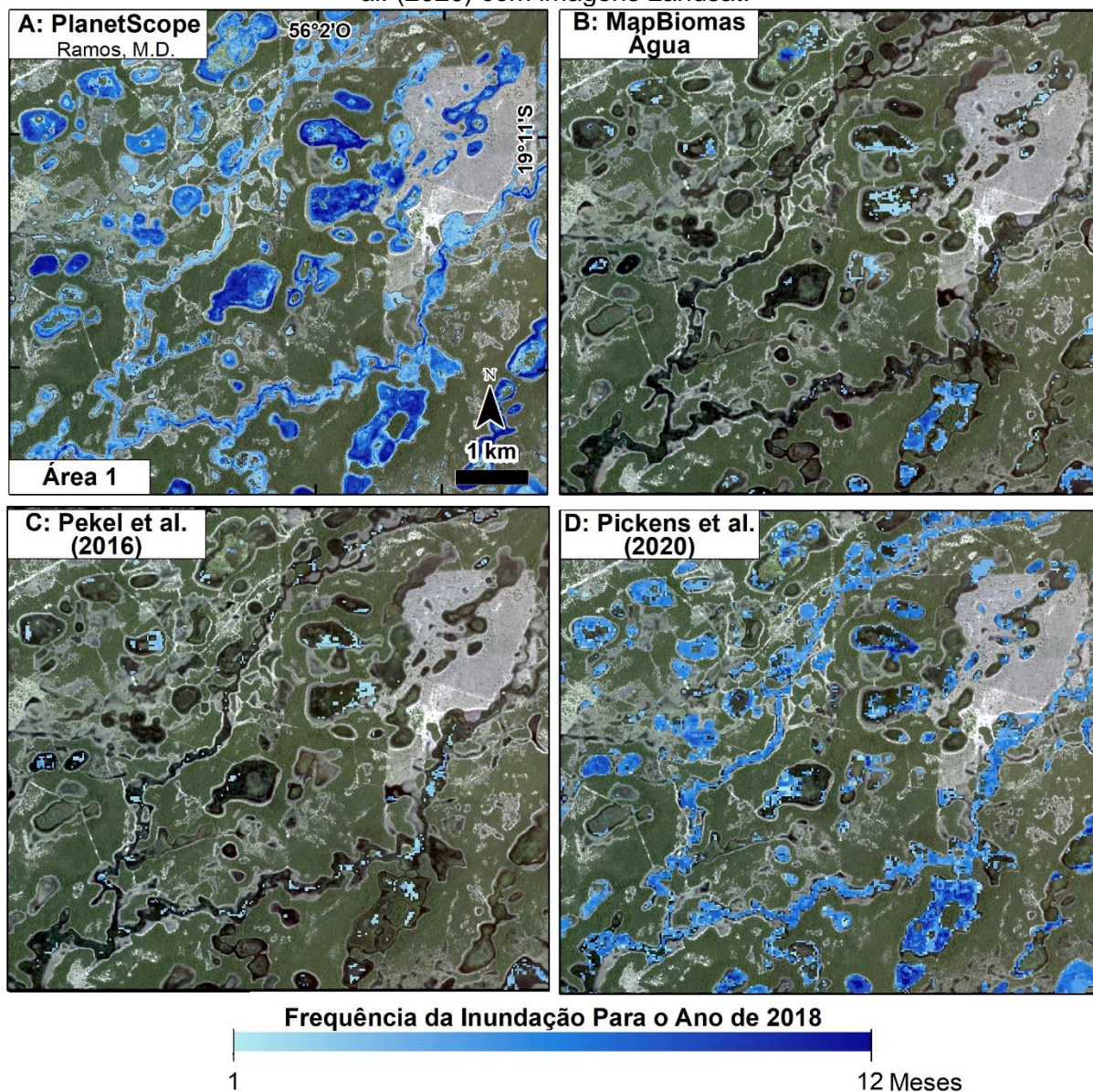
## 5 DISCUSSÃO

As ferramentas disponibilizadas na plataforma do GEE, como o classificador *Random Forests*, reclassificadores e operadores matemáticos tiveram um desempenho satisfatório no processamento de imagens do sensor *PlanetScope*. Apesar de limitações espectrais desse sensor que é, por ora, utilizado principalmente para fins comerciais, as resoluções temporais e espaciais foram essenciais para os resultados obtidos, tanto para a seleção de boas imagens em datas ideais, quanto para o nível de detalhamento das análises.

A alta capacidade de processamento dos dados dos nanossatélites na plataforma do GEE foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho, pois permitiu todo o processamento em larga escala feito na nuvem. Dessa forma foi possível gerar produtos como mapas de frequência de inundação, gráficos de superfície de água ao longo da série temporal e composições RGB do comportamento espaço-temporal da inundação. Esses produtos podem ser considerados como a primeira sistematização de alta resolução (espacial e temporal) dos alagamentos sazonais da Nhecolândia. A fim de exemplificação, observa-se nas Figuras 18, 19 e 20 uma comparação do produto deste trabalho e o resultado do projeto MapBiomias Água e dos trabalhos de Pekel *et al.* (2016) e Pickens *et al.* (2020) para as Áreas 1, 2 e 3, respectivamente. Os dados foram filtrados de forma a apresentarem apenas valores de água registrados ao longo dos 12 meses do ano de 2018. A partir do mesmo recorte de área, período e parâmetros de visualização, é possível observar as diferenças na capacidade do mapeamento da superfície de água entre as distintas metodologias e fonte de dados. Ao fundo, uma imagem RGB *PlanetScope* do dia mais inundado de 2018 (ápice da cheia) auxilia na visualização para todas as áreas.

Observa-se que há uma grande diferença entre as classificações, considerando o detalhamento e abrangência da informação, de forma geral, os nanossatélites oferecem uma disponibilidade de imagens 12 vezes maior do que os sensores *Landsat*. A resolução espacial, por sua vez, consegue identificar feições com até dez vezes mais níveis de detalhe do que o sensor tradicional. Como resultado, tem-se, a partir da fonte de dados *PlanetScope*, uma maior facilidade no mapeamento de eventos altamente sazonais da Nhecolândia, como a cheia das vazantes e na identificação de pequenas superfícies de água, como em lagoas cobertas por macrófitas.

**Figura 18** - Mapeamento da frequência de inundação do ano de 2018 na Área 1 em diferentes trabalhos. A: Produto do processamento deste trabalho com imagens PlanetScope; B: Produto do projeto do MapBiomias Água com imagens Landsat; C: Produto do trabalho de Pekel *et al.* (2016) com imagens Lansat; D: Produto do trabalho de Pickens *et al.* (2020) com imagens Landsat.

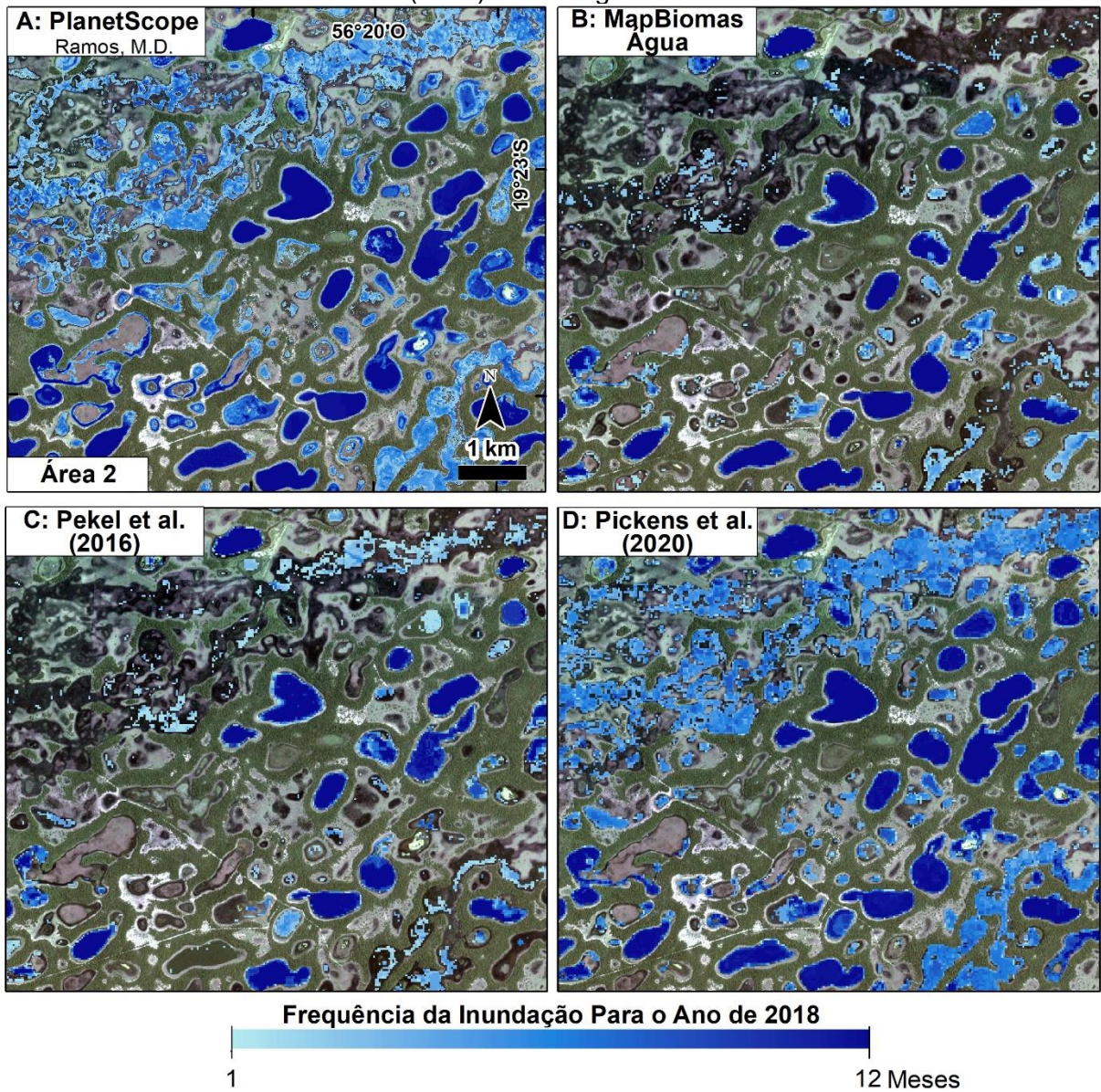


Fonte: Elaborado pela autora.

Dentre os estudos pioneiros no processamento de imagens Landsat no GEE, destaca-se o trabalho de Pickens *et al.* (2020) como o que melhor identificou a superfície de água para o ano de 2018 nas três áreas piloto. Pode-se dizer que os autores adaptaram o método de Pekel *et al.* (2016) de forma efetiva para o mapeamento de eventos locais e sazonais visto que, além do produto dos nanossatélites, foi o único trabalho capaz de mapear a cheia das vazantes para todas as áreas. As maiores diferenças do produto de Pickens *et al.* (2020) com o gerado no

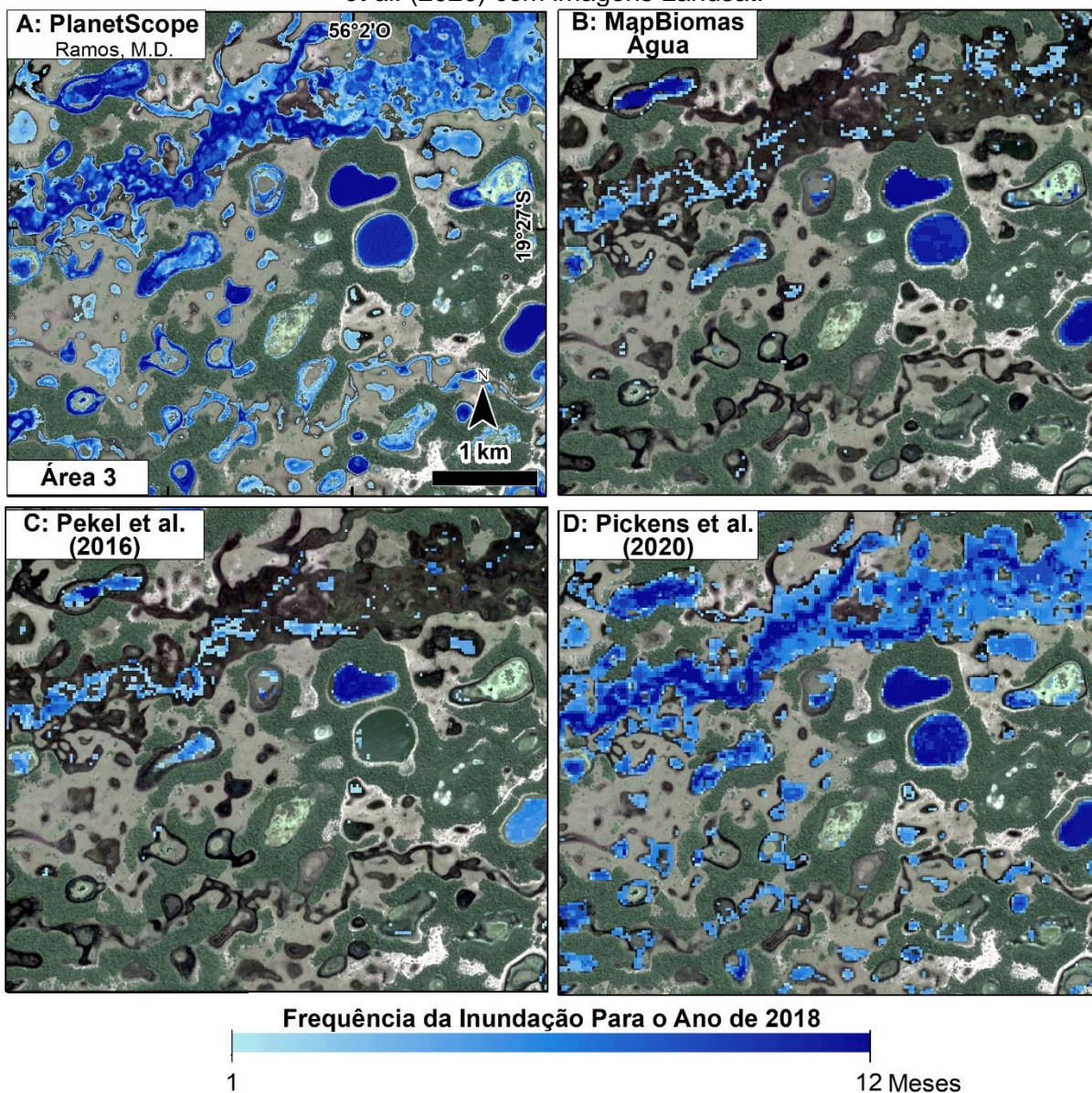
presente trabalho refere-se ao detalhamento espacial da inundação, característica diretamente relacionada à resolução espacial dos sensores PlanetScope e Landsat, 3 e 30 m, respectivamente.

**Figura 19** - Mapeamento da frequência de inundação do ano de 2018 na Área 2 em diferentes trabalhos. A: Produto do processamento deste trabalho com imagens PlanetScope; B: Produto do projeto do MapBiomias Água com imagens Landsat; C: Produto do trabalho de Pekel *et al.* (2016) com imagens Landsat; D: Produto do trabalho de Pickens *et al.* (2020) com imagens Landsat.



Fonte: Elaborado pela autora.

**Figura 20** - Mapeamento da frequência de inundação do ano de 2018 na Área 3 em diferentes trabalhos. A: Produto do processamento deste trabalho com imagens PlanetScope; B: Produto do projeto do MapBiomias Água com imagens Landsat; C: Produto do trabalho de Pekel *et al.* (2016) com imagens Landsat; D: Produto do trabalho de Pickens *et al.* (2020) com imagens Landsat.



Fonte: Elaborado pela autora.

A diversidade de respostas espectrais e os processos altamente sazonais da região da Nhecolândia podem gerar limitações para estudos da superfície de água feitos com sistemas sensores tradicionais. A utilização de constelações de nanossatélites tem muito a contribuir para o fornecimento de novas e detalhadas informações, principalmente em estudos relacionados à inundação do Pantanal e outras áreas alagadas ao redor do globo. Pode-se dizer que as oportunidades de novas pesquisas no campo do sensoriamento remoto de sistemas aquáticos

continentais, devido à alta resolução espacial e temporal dos nanossatélites, juntamente com a alta capacidade de processamento de dados espaciais proporcionada pelas plataformas de computação em nuvem, oferecem um ramo produtivo para a dedicação de estudos em áreas como a da Nhecolândia, com a finalidade de monitorar suas dinâmicas de alta sazonalidade.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi observado que os picos de inundação na região da Baixa Nhecolândia estão diretamente associados aos picos de precipitação da região. O pico de inundação manifesta-se em cada uma das áreas piloto de forma cíclica e ordenada, condicionados pela precipitação e pela manifestação do pulso de inundação da Vazante do Mangabal. A passagem do pulso de inundação demora, em média, dois meses de diferença para atingir a Área 1 (mais ao norte) e a Área 3 (mais ao sul), essa velocidade é condicionada pelo baixo gradiente topográfico, pois, na extensão de 85 km entre as duas áreas piloto, há uma diferença de altitude de apenas 25 m. As alterações na paisagem entre os períodos mais secos e mais cheios são muito intensas, sendo da ordem de 20% da área total que são convertidas em superfície de água. As expressivas e altamente sazonais alterações na paisagem observadas na Nhecolândia, em função da sua dinâmica hídrica, destacam a necessidade de se obter informações de grande detalhe sobre essa região única e, inclusive, compreendê-la como uma área sensível ao contexto das mudanças climáticas, especialmente em relação a alteração no regime de chuvas. As resoluções espaciais e temporais *PlanetScope* foram essenciais tanto para o detalhamento das feições mapeadas, como lagoas menores e cobertas por vegetação aquática, quanto para a identificação de eventos de cheia das vazantes. O grande ganho de informação espacial e temporal obtido com o processamento das imagens *PlanetScope* indica os nanossatélites como uma importante fonte de dados de ambientes lacustres altamente sazonais.

## REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. O pantanal mato-grossense e a teoria dos refúgios. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 50, n. esp., p. 9-57, 1988.

ALMEIDA, T. I. R. de *et al.* Proposta de classificação e gênese das lagoas da Baixa Nhecolândia-MS com base em sensoriamento remoto e dados de campo. **Revista Brasileira de Geociências**, [S. l.], v. 33, n. 2-supl., p. 83-90, jun. 2003. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.200333s28390>.

ASSINE, M. L. *et al.* Geology and Geomorphology of the Pantanal Basin. In: BERGIER, I.; ASSINE, M. L. (Eds.) **Dynamics of the Pantanal Wetland in South America**. Springer International Publishing, (The Handbook of Environmental Chemistry), [S. l.], v. 37, p. 23- 50, 29 ago. 2015a.

ASSINE, M. L. *et al.* The Quaternary alluvial systems tract of the Pantanal Basin, Brazil. **Brazilian Journal Of Geology**, [S. L.], v. 45, n. 3, p. 475-489, set. 2015b. DOI: 10.1590/2317-4889201520150014.

ASSINE, M. L. River avulsions on the Taquari megafan, Pantanal wetland, Brazil, **Geomorphology**, [S. l.], v. 70, n. 3-4, p. 357-371, set. 2005. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.02.013.

ASSINE, M. L. **Sedimentação na Bacia do Pantanal Mato-Grossense, Centro-Oeste do Brasil**. 2003. 106 f. Tese (Livre-Docência) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.

BARBIERO, L. *et al.* Soil morphological control on saline and freshwater lake hydrogeochemistry in the Pantanal of Nhecolândia, Brazil. **Geoderma**, [S. l.], v. 148, n. 1, p. 91-106, 30 nov. 2008. DOI: 10.1016/j.geoderma.2008.09.010.

BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. **Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos**: princípios e aplicações. 1. ed.. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. 161 p.

BATISTA, G. E. A. P. A. **Pré-processamento de dados em aprendizado de máquina supervisionado**. 2003. Tese (Doutorado em Ciências de Computação e Matemática Computacional) -Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. DOI: 10.11606/T.55.2003.tde-06102003-160219.

BREIMAN, L. Random Forests. **Machine Learning**, [S. l.], Springer Science and Business Media LLC. v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001. DOI: 10.1023/a:1010933404324.

CARVALHO JÚNIOR, O. A. 2018. Aplicações E Perspectivas Do Sensoriamento Remoto Para O Mapeamento De Áreas Inundáveis. **Revista de Geografia**, Recife, v. 35, n. 4, p. 412–431, 2018. DOI: 10.51359/2238-6211.2018.238239.

COOLEY, S. W. *et al.* Arctic-Boreal lake dynamics revealed using CubeSat imagery. **Geophysical Research Letters**, [S. l.], v. 46, n. 4, p. 2111–2120. 2019. DOI: 10.1029/2018GL081584.

CORDEIRO, J. P.; BARBOSA, C. C. F.; CÂMARA, G. Álgebra de Campos e Objetos. *In: CÂMARA et al. (Orgs.). Introdução à Ciência da Geoinformação*. [S. l.]: INPE, 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>. Acesso em: 01 jun. 2020.

COSTA, M.; TELMER, K. Utilizing SAR imagery and aquatic vegetation to map fresh and brackish lakes in the Brazilian Pantanal wetland. **Remote sensing of Environment**, [S. l.], v. 105, n. 3, p. 204-213, 15 dez. 2006. DOI: 10.1016/j.rse.2006.06.014

EHRET, T. *et al.* Automatic Monitoring of Water Level in Small Lakes Using Planetscope. *In: 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*. IEEE, [S. l.], p. 3356-3359, 11-16 jul. 2021. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554431.

ESA, **The Sentinel Online Handbook**, European Space Agency, Noordwijk, Netherlands, 2020. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>. Acesso em: 01 jun. 2020.

EVANS, T. L.; COSTA, M. Landcover classification of the Lower Nhecolândia subregion of the Brazilian Pantanal Wetlands using ALOS/PALSAR, RADARSAT-2 and ENVISAT/ASAR imagery. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 128, p. 118-137, 2013. DOI: 10.1016/j.rse.2012.09.022

FINLAYSON C. M.; MILTON G. R.; PRENTICE R. C., Wetland Types and Distribution. *In: FINLAYSON, C. M.; MILTON G.; PRENTICE R. C.; DAVIDSON N. (Eds.) The Wetland Book*. Dordrecht: Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-94-007-4001-3\_186

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data** 2, [S. l.], v. 150066, 2015. DOI: 10.1038/sdata.2015.66.

FURIAN, S. *et al.* Chemical diversity and spatial variability in myriad lakes in Nhecolândia in the Pantanal wetlands of Brazil. **Limnology and Oceanography**, v. 58, n. 6, p. 2249-2261, 14 nov. 2013. DOI: 10.4319/lo.2013.58.6.2249.

GOOGLE. **Google Earth Engine API**. 2020 Disponível em: <https://developers.google.com/earth-engine>. Acesso em: 02 jun. 2020.

GORELICK, N. *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote sensing of Environment**, [S. l.], v. 202, p. 18–27, 2017. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.

GUERREIRO, R. L. *et al.* Paleoecology explains Holocene chemical changes in lakes of the Nhecolândia (Pantanal-Brazil). **Hydrobiologia**, [S. l.], v. 815, n. 1, p. 1-19, 2018. DOI: 10.1007/s10750-017-3429-3.

HAMILTON, S. K.; SOUZA, O. C. de; COUTINHO, M. E. Dynamics of floodplain inundation in the alluvial fan of the Taquari River (Pantanal, Brazil). **SIL Proceedings**, [S. l.], v. 26, n. 3, p. 1922-2010, 1998. DOI: 10.1080/03680770.1995.11900852.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa - BDMEP**. Brasília, DF, Brasil, c2020. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 09 mar. 2020.

JUNK, W. *et al.* Biodiversity and its conservation in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. **Aquatic Sciences**, [S. l.], v. 68, n. 3, p. 278-309, 12 ago. 2006. DOI: 10.1007/s00027-006-0851-4.

JUNK, W.; BAYLEY, P.; SPARKS, R. The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems. **Canadian special publication of fisheries and aquatic sciences**, [S. l.], v. 106, n. 1, p. 110-127, 1989.

KEDDY, P. A. *et al.* Wet and Wonderful: The World's Largest Wetlands Are Conservation Priorities. **Bioscience**, [S. l.], v. 59, n. 1, p. 39-51, 01 jan. 2009. DOI: 10.1525/bio.2009.59.1.8.

KÖPPEN, W. **Grundriss der Klimakunde**. Berlin: Walter de Gruyter, 1931. 390 p.

KUMAR, L.; MUTANGA, O. Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential. **Remote sensing of Environment**, [S. l.], v. 10, p. 1–15, 2018. DOI: 10.3390/rs10101509.

LOH, W. Classification and Regression Trees. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery**, Belmont, v. 432, n. 1. P. 14 – 23, 2011. DOI: 10.1002/widm.8.

MAPBIOMAS. **Mapeamento da Superfície de Água do Brasil Coleção 1**. Plataforma Brasil, [S. l.], c2022. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/agua>. Acesso em: 10 dez. 2021.

MCGLUE, M. M. *et al.* Holocene stratigraphic evolution of saline lakes in Nhecolandia, southern Pantanal wetlands (Brazil). **Quaternary Research**. New York: Cambridge Univ Press, v. 88, n. 3, p. 472-490, 2017. DOI: <http://hdl.handle.net/11449/159902>.

MERINO, E. R.; ASSINE, M. L. Hidden in plain sight: How finding a lake in the Brazilian Pantanal improves understanding of wetland hydrogeomorphology. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 45, n. 2, p. 440-458, 2020. DOI: 10.1002/esp.4745.

MITCHELL, T. M. **Machine Learning**, 1. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1997.

NAGEL, G.; NOVO, E.; KAMPEL, M. Nanosatellites applied to optical Earth observation: a review. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**. 15. 2020. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2513>.

NIROUMAND-JADIDI, M. *et al.* Physics-based bathymetry and water quality retrieval using planetscope imagery: Impacts of 2020 COVID-19 lockdown and 2019 extreme flood in the Venice Lagoon. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 12, n. 15, p. 2381, 2020. DOI: 10.3390/rs12152381.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

OLOFSSON, P. *et al.* Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change, **Remote sensing of Environment**, [S. l.], v. 148, p. 42-57, 25 maio 2014. DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.015.

OZESMI, S. L.; BAUER, M. E. Satellite remote sensing of wetlands. **Wetlands Ecology and Management**, [S. l.], v. 10, p. 381–402, 2002. DOI: 10.1023/A:1020908432489.

PADOVANI, C. R. **Dinâmica das Inundações do Pantanal**. 2010. 174 p. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010. DOI: 10.11606/T.91.2010.tde-14022011-170515.

PEKEL, J. F. *et al.* High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. **Nature**, [S. l.], v. 540, p. 418–422, 07 dez. 2016. DOI: 10.1038/nature20584.

PEREIRA, E.; ABREU, L. G. A.; MAILLARD, P. Altimetria Por Satélite Radar Aplicada A Hidrologia No Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 69, n. 2, p. 347-360, fev. 2017.

PEREIRA, F. J. S. *et al.* Estimation of suspended sediment concentration in an intermittent river using multi-temporal high-resolution satellite imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [S. l.], v. 79, p. 153-161, 2019. DOI: 10.1016/j.jag.2019.02.009.

PEREIRA, O. J. R. *et al.* Estimating Water pH Using Cloud-Based Landsat Images for a New Classification of the Nhecolândia Lakes (Brazilian Pantanal). **Remote sensing of Environment**, [S. l.], v. 12, n. 7, p. 1090, 28 mar. 2020. DOI: 10.3390/rs12071090. PLANET LABS. **Planet Imagery Product Specification**. São Francisco: Planet Labs, v. 56, 2016.

PICKENS, A. H. *et al.* Mapping and sampling to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full Landsat time-series, *Remote Sensing of Environment*, [S. l.], v. 243, n.111792, 15 jun. 2020. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111792.

PLINK-BJÖRKLUND, P. Morphodynamics of rivers strongly affected by monsoon precipitation: Review of depositional style and forcing factors. **Sedimentary Geology**, [S. l.], v. 323, p. 110-147, 15 jun. 2015. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2015.04.004.

POTT, A.; SILVA, J. S. V. Terrestrial and Aquatic Vegetation Diversity of the Pantanal Wetland. *In*: BERGIER, I.; ASSINE, M. L. (Eds.) **Dynamics of the Pantanal Wetland in South America**. Springer International Publishing, (The Handbook of Environmental Chemistry), [S. l.], v. 37, p. 111 - 131, 29 ago. 2015.

POURSANIDIS, D. *et al.* Cubesats allow high spatiotemporal estimates of satellite-derived bathymetry. **Remote Sensing**, [S. I.], v. 11, n. 11, p. 1299, 31 maio 2019. DOI: 10.3390/rs11111299.

ROY, D. P. *et al.* A global analysis of the temporal availability of PlanetScope high spatial resolution multi-spectral imagery. **Remote Sensing of Environment**, [S. I.], v. 264, p. 112586, out. 2021. ISSN 0034-4257. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112586.

SHETTY, S. **Analysis of Machine Learning Classifiers for LULC Classification on Google Earth Engine**. 2019. 73 p. Tese (Mestrado Ciência em Geoinformação Ciência e Observação da Terra) - Universidade de Twente, Enschede, The Netherlands, mar. 2019.

STRICK, R. J. P. *et al.* Quantification of bedform dynamics and bedload sediment flux in sandy braided rivers from airborne and satellite imagery. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S. I.], v. 44, n. 4, p. 953–972, 2019. DOI: 10.1002/esp.4558.

YAMAZAKI, D. *et al.* A high accuracy map of global terrain elevations, **Geophysical Research Letters**, [S. I.], v. 44, p. 5844-5853, 2017. DOI: 10.1002/2017GL072874.

ZANI, H. *et al.* Redes de drenagem distributária e formas deposicionais no megaleque do Taquari, Pantanal: uma análise baseada no MDE-SRTM. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. I.], v. 10, n. 2, p. 21–28, jul.-dez. 2009. DOI: 10.20502/rbg.v10i2.127.

ZANI, H.; ASSINE, M. L. Paleocanais no megaleque do rio Taquari: mapeamento e significado geomorfológico. **Brazilian Journal of Geology**, [S. I.], v. 41, p. 37-43, 2011. DOI: 10.25249/0375-7536.20114113743.

ZANI, H.; ASSINE, M. L.; MCGLUE, M. M. Remote sensing analysis of depositional landforms in alluvial settings: Method development and application to the Taquari megafan, Pantanal (Brazil). **Geomorphology**, [S. I.], v. 161-162, p. 82–92, 01 ago. 2012. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.04.003.