

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE
RECURSOS RENOVÁVEIS -PPGPUR

ALINE DELFINO GERMANO

Métodos de detecção de mudança de uso e cobertura do solo para
monitoramento ambiental

SOROCABA

2022

ALINE DELFINO GERMANO

Métodos de detecção de mudança de uso e cobertura do solo para
monitoramento ambiental

Defesa da Tese apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Planejamento e Uso de Recurso
Renováveis para obtenção do título
de Doutor em Planejamento e Uso de
Recursos Renováveis.

Orientadora: Profa. Dra. Roberta
Averna Valente

SOROCABA

2022

Germano, Aline Delfino

Métodos de detecção de mudança de uso e cobertura do solo para monitoramento ambiental / Aline Delfino Germano -- 2022.
50f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Roberta Averno Valente

Banca Examinadora: Raoni Wainer Duarte Bosquilia, Ivan Vanderley Silva, Adriana Cavalieri Sais, Kaline de Mello

Bibliografia

1. Pagamentos por serviços ambientais. 2. Perda de floresta nativa. 3. sensoriamento remoto . I. Germano, Aline Delfino. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade
Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Aline Delfino Germano, realizada em 09/06/2022.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Roberta Aversa Valente Botezelli Tolini (UFSCar)

Prof. Dr. Raoni Wainer Duarte Bosquilia (UTFPR)

Prof. Dr. Ivan Vanderley Silva (Prefeitura de Barueri)

Profa. Dra. Adriana Cavalieri Sais (UFSCar)

Profa. Dra. Kaline de Mello (UFSCar)

DEDICATÓRIA

A todos que me ajudaram ao longo
desta caminhada.

Dedico...

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me abençoar e nunca me abandonar.

O presente trabalho, não poderia chegar onde chegou, sem o valioso apoio de inúmeras pessoas.

Em primeiro lugar não poderia deixar de agradecer a minha orientadora, Professora Dra. Roberta A. Valente, por ter tido companheirismo, calma, compreensão e por todo o empenho com que sempre me orientou. Muito obrigada por tudo!

Agradeço imensamente aos meus grandes amigos pesquisadores do grupo de pesquisa GEOPLAN que fizeram dos meus dias melhores, com muitas trocas de conhecimentos e enriquecimento acadêmico e pessoal. Mesmo em um período pandêmico. Gratidão!

À Universidade Federal de São Carlos (UFSCar-So) e ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recurso Renováveis (PPGPUR) pelo amparo durante o período do Doutorado. À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro por meio de bolsa de estudos. Obrigada!

Aos meus bons amigos pelo companheirismo, pela cumplicidade e pelo apoio em todos os momentos delicados da minha vida. Vocês são tudo!

E por último não menos importante, e sim, fartamente importante, agradeço imensamente a minha linda família. Vocês são vida!!

GRATIDÃO!

RESUMO

O monitoramento florestal torna-se, atualmente, indispensável para o planejamento ambiental. Por meio dele pode-se detectar e espacializar mudanças do uso e cobertura do solo, tornando-se uma ferramenta para a tomada de decisão. Neste contexto, o objetivo geral do estudo foi avaliar métodos de detecção de mudanças (DM), que suportem a identificação de alterações do uso e cobertura do solo em paisagens agrícolas. O estudo foi realizado na bacia do rio Sarapuí (SP, Brasil), utilizando imagens dos satélites Landsat 5 e 8, em quatro diferentes anos. Avaliou-se três métodos de DM, sendo eles por índice de vegetação normalizada (DM_{NDVI}), por diferença de imagem direta (DM_{DID}) e por análise de vetor de mudança (AVM), com e sem correções radiométrica e atmosférica. Posteriormente, realizou-se uma classificação supervisionada a objetos e obteve-se os respectivos limiares de DM. Verificou-se, usando o teste Z, que os métodos se diferenciam estatisticamente, exceto quando comparados os métodos com e sem correção. Portanto, para definir o método mais adequado, qualificou-se os métodos pelos falsos positivos e falsos negativos, e o DM_{NDVI} apresentou melhores resultados. Com as áreas de mudanças delimitadas realizou-se a intersecção com o uso e cobertura do solo atual e com as áreas prioritárias para conservação florestal da área de estudo. Obteve-se, que nos últimos trinta anos, 22% da área total da bacia sofreu, em algum momento, mudanças em seu uso e cobertura do solo, sendo que em cerca de 6,14% de sua área total houve incremento de vegetação e em 15,97% perda desta cobertura. De forma geral, conclui-se que o método DM_{NDVI} apresenta melhores resultados, auxiliando na tomada de decisão para identificação das áreas para o pagamento dos serviços ambientais, ou seja, indicando áreas em que houve ganho de vegetação.

Palavras-chaves: Mata atlântica, Perda de floresta nativa, análise temporal e sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Forest monitoring is currently indispensable for environmental planning. Through it, it is possible to detect and spatialize changes in land use and cover, becoming a tool for decision-making. In this context, the general objective of the study was to evaluate change detection methods (DM), which support the identification of changes in land use and cover in agricultural landscapes. The study was carried out in the Sarapuí river basin (SP, Brazil), using images from Landsat 5 and 8 satellites, in four different years. Three DM methods were evaluated, being them by normalized vegetation index (DM_{NDVI}), by direct image difference (DM_{DID}) and by change vector analysis (AVM), with and without radiometric and atmospheric corrections. Subsequently, a supervised classification of objects was performed and the respective DM thresholds were obtained. It was verified, using the Z test, that the methods differ statistically, except when the methods with and without correction are compared. Therefore, to define the most appropriate method, the methods were qualified by false positives and false negatives, and the DM_{NDVI} presented better results. With the delimited areas of change, the intersection with the current use and land cover and with the priority areas for forest conservation in the study area was carried out. It was found that in the last thirty years, 22% of the total area of the basin suffered, at some point, changes in its use and soil cover, and in about 6.14% of its total area there was an increase in vegetation and in 15.97% loss of this coverage. In general, it is concluded that the DM_{NDVI} method presents better results, helping in the decision-making process to identify areas for the payment of environmental services, that is, indicating areas where there was a gain in vegetation.

Keywords: Mata Atlantic, loss of native forest, temporal analysis and remote sensing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.	18
Figura 2. Modelo conceitual para o diagnóstico de detecção de mudança e aplicações na bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.	21
Figura 3. Comportamento das mudanças que podem ocorrer no método AVM.	23
Figura 4. Comportamento da Magnitude e distância do método AVM.	23
Figura 5. Modelo conceitual para a avaliação dos métodos de detecção de mudança da bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.	27
Figura 6. Uso e cobertura do solo da bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil do ano de 2019.	28
Figura 7. Perfil dos acertos e erros dos métodos para a bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.	32
Figura 8. Comportamento dos falsos positivos e negativos para os métodos de DM aplicados para a bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.	32
Figura 9. Distribuição espacial da intersecção das áreas de mudanças do método DM _{NDVI} para bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.	35
Figura 10. Mudança no uso e cobertura do solo nos últimos trinta anos na bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.	37
Figura 11. Distribuição da perda de vegetação para uso antrópico dos últimos trinta anos na bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.	38
Figura 12. Exemplos da perda de vegetação para uso antrópico na bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características dos sensores abordo da série de satélite do Landsat, utilizados nos métodos de DM, na bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.	20
Tabela 2. Limiares de classificação para os métodos estudados para bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.	30
Tabela 3. Teste Z de comparação estatística entre os métodos avaliados para a bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.	33
Tabela 4. Perda e ganho de vegetação no DM_{NDVI} para a bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil	34
Tabela 5. Perda e ganho de vegetação das mudanças de 1988 a 2019 na bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
	2.1. Detecção de Mudança do uso e cobertura do solo	14
	2.2. Monitoramento Ambiental: Importância e Diagnóstico.....	16
3	Material e Métodos	18
	3.1. Área de Estudo	18
	3.2. Detecção de Mudança	19
	3.2.1. <i>Pré-processamento das imagens</i>	20
	3.2.2. <i>Métodos de detecção de mudança</i>	21
	3.2.3. <i>Classificação supervisionadas das imagens</i>	24
	3.2.4. <i>Estatísticas aplicadas à detecção de mudanças</i>	25
	3.3. Quantificação do Ganho e Perda de Vegetação	27
4	Resultados e Discussão	29
	4.1. Avaliação dos Métodos de Detecção de Mudança	29
	4.2. Quantificação de Perdas e Ganhos de Vegetação	34
5	Conclusão.....	40

1 INTRODUÇÃO

Proteger o meio ambiente é um dos desafios globais mais difíceis, por isso, tornou-se um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (WOOD et al., 2018).

Em contrapartida, a proteção do meio ambiente, o desenvolvimento científico sustentável traz a promessa de solucionar estes problemas vivenciados e muitas das vezes proporcionados pelos seres humanos. Em respostas as ações antrópicas, inúmeras estratégias para a conservação e recuperação de ambientes naturais, tem sido desenvolvida (SANTOS et al., 2020 e COSTA et al., 2019).

Para o êxito destes processos de conservação e restauração do ambiente, o planejamento é indispensável. Planejar significa a formulação sistemática de objetivos e ações alternativas, para que ao final, a escolha aconteça sobre a melhor metodologia de ação. E este processo leva em considerações os comportamentos das ações antrópicas considerando a capacidade de suporte dos ecossistemas ali presentes (FRANCO, 2001).

E ter este planejamento auxilia em tomadas de decisões ágil, já que a demanda por desenvolvimento de resposta rápidas, principalmente para desastres naturais ou ocasionados por fatores antrópicos, tem mostrado a necessidade de processos científicos automatizados para detecções de alterações nas paisagens naturais e não-naturais (KHELIFI e MIGNOTTE, 2020).

Desta forma, o planejamento torna-se um recurso para priorizar ações, a contar dos objetivos de acordo com orçamentos embutidos. E quando se fala de conservação e restauração para recursos naturais, técnicas para o planejamento são empregadas, assim como as geotecnologias.

Silva (2020) utilizou-se das geotecnologias para o planejamento de uso irregulares em áreas adjacentes aos rios, e Sousa (2021) para a expansão territorial de áreas urbanas, já Ribeiro et al. (2020) utilizaram-se das ferramentas geotecnológicas para a obtenção da estrutura da paisagem visando à conservação da biodiversidade no cenário urbano.

A utilização de geotecnologias, sejam elas em ambientes de sensoriamento remoto (SR) ou em sistema de informação geográficas (SIG), é comumente utilizada, visto que permitem os subsídios para tomadas de

decisões, já que se pode avaliar diferentes variáveis ambientais em um único plano de informação (JENSEN e JOHN, 2009).

Contudo, para a utilização das geotecnologias, são necessários conhecimentos de entrada de dados, processamento e das utilizações das ferramentas a serem aplicadas, pois podem intervir de maneira direta ou indireta no resultado. Posto isto, a aplicabilidade das geotecnologias depende do objetivo a ser empregado, dado que, a oferta de produtos e ferramentas é alta e sua aplicabilidade torna-se essencial.

A detecção de mudança (DM) tem sido uma ferramenta importante para entender a dinâmica do uso e cobertura do solo. Desde a década de 80, estudos aprimoram essa técnica, dentre os quais pode-se citar Howarth e Wickware (1981), os pioneiros na técnica de detecção de mudanças, utilizando metodologias de processamento digital.

De acordo com Tunner et al. (2007) informações explícitas de uso do solo e de suas mudanças auxiliam no monitoramento do ecossistema, na gestão e planejamento de terras. Metodologias de detecção de mudanças, fundamentam-se na variação espectral direta, ou seja, na mudança real ocorrida em um período de análise.

Neste contexto tem-se a hipótese de que a partir de processos e índices de SR já estabelecidos pode-se ter um método de DM de fácil aplicação, mesmo para não especialistas de SR. Em que se obtenha um método que permita, para diferentes fins, atualizações de mudanças, independente dos usos e cobertura do solo que se tem.

Portanto, o objetivo geral do estudo foi avaliar um método de DM, que suporte a identificação de alterações do uso e cobertura do solo em paisagem agrícolas. Os objetivos específicos foram:

- (i) avaliar métodos de DM baseados em Índice de vegetação e modelos matemáticos;
- (ii) aferir a performance dos dados (i.e., imagens de satélite) para DM, com e sem tratamentos de pré-processamento; e
- (iii) quantificar o processo de perda de cobertura vegetal nativa de uma bacia agrícola por meio do método de DM.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Detecção de mudança do uso e cobertura do solo

O sensoriamento remoto (SR) é um recurso indispensável para o monitoramento territorial, principalmente no que se refere a dados quantitativos de vegetação. De acordo com Ponzoni (2001) e Brandelero et al. (2010), o estudo da cobertura vegetal surge em diferentes linhas de pesquisa, sendo o SR uma das tecnologias que vêm contribuindo para o avanço do conhecimento da vegetação.

Diante desta melhoria, uma das vertentes do SR é a detecção de mudança (DM), a qual consiste na identificação das alterações da superfície terrestre por meio do monitoramento de imagens de satélites com identificação dos alvos via comportamento espectral (LIMA et al., 2017).

Em termos gerais, a DM configura-se como uma metodologia de comparação de duas ou mais imagem do mesmo local em datas distintas, a fim de comparar as diferenças quanto ao uso e cobertura do solo. Conseqüentemente, a DM consiste na quantificação de fenômenos temporais fundamentados em imagens adquiridas por sensores orbitais (COPPIN e BAUER, 1996).

Jensen e John (2009) indicam que existem alguns métodos de detecção de mudança, dentre os quais estão a detecção orientada ao objeto e a pixel a pixel, isto independentemente do método de classificação utilizado. Já segundo Lu et al. (2004) e Singh (1989) os métodos de classificação são qualificados em dois, sendo um a comparação pós-classificação, em que primeiramente se classifica a área de interesse nos dois tempos e, posteriormente, compara-se os mapas finais. E os métodos pré-classificação, sendo aqueles que identificam mudanças diretamente.

Lu et al. (2004) detalharam que, por conveniência, os métodos de detecção de alterações são agrupados em categorias, sendo eles a álgebra de mapas, a transformação, a classificação, a avançado modelos matemáticos, as abordagens do Sistema de Informação Geográfica (SIG), a análise visual, e outras abordagens.

Segundo Canty (2018) a forma mais simples de detectar mudanças em duas imagens é a aplicação de operações aritméticas de subtração entre bandas

de comprimentos de ondas iguais, só que em anos diferentes, e depois examinar as diferenças existentes. De acordo com Jensen (2015) e Tewkesbury et al. (2015), pequenas mudanças na intensidade dos valores das imagens geradas (i.e., produtos), indicam as regiões em que não ocorrem mudanças.

As técnicas de diferença de imagens e razões são ferramentas fáceis de implementação e baixo custo operacional. Uma das técnicas mais difundidas dentre as metodologias é análise de vetor de mudança (AVM) proposta por (MALILA, 1980). Nessa análise, a DM não supervisionada, baseia-se em cálculos de subtração de vetores de mudança espectral e limiarização, baseando-se na direção do ângulo do vetor de mudança e da magnitude da mudança dos diferentes dados para, posteriormente, comparar-se com o limiar. Como contraponto dessa técnica, tem-se que a mudança e a magnitude podem ser ambíguas (BOVOLO et al., 2012).

Diante dos diversos métodos que podem ser aplicados e desenvolvidos, observa-se a busca por um adequado, bem como em outros estudos o aprimoramento de métodos já desenvolvidos, visando se obter resultados significativos ou aplicação de métodos de maneira mais simples.

Neste contexto pode-se citar Ibrahim (2016), que utilizou a série Landsat dos anos 1990 a 2015 para detecção de uso antrópico; Bovolo et al. (2012) que testaram técnicas de detecção de mudanças não supervisionadas com imagens multiespectral e bi temporal; Rodrigues et al. (2019) que aplicaram seu conceito utilizando imagens de sensores ópticos e radar de média resolução para detecção de desmatamento ilegal; e Ribeiro et al. (2016) que concluíram que os índices de vegetação em baixa resolução foram eficientes para a detecção de mudanças de padrões espaciais no sertão nordestino.

No Brasil, um projeto bastante difundido e utilizado para controle de desmatamento foi o Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES), realizado desde 1988. Nele se utiliza sensores como a série do Landsat, CBERS e IRS-2. Entretanto, a interpretação da detecção de mudança é realizada por fotointerpretação (INPE, 2021).

De acordo com Yu et al. (2016) há poucos estudos abordando a temática de detecção de mudanças baseada em objetos. Segundo Zhu (2017), a detecção de mudanças para uso e cobertura do solo não é um processo simples, considerando que os processos exigem tempo e esforço computacionais.

Entretanto, é uma técnica importante para o monitoramento dinâmicos das paisagens (OKYAY et al., 2019)

Lu et al. (2019) utilizaram a detecção de mudanças para verificação da expansão urbana (i.e., últimos 30 anos) com produtos dos sensores a bordo do Landsat e MODIS. Abuya et al. (2019) avaliaram a capacidade de infraestrutura urbana de uma região, a partir de imagens do satélite Landsat, concluindo que existe uma relação entre o aumento da população a expansão territorial urbana.

Estudos como de os Islam et al. (2018) e Pirnazar et al. (2018) basearam-se na classificação supervisionada para detectar alterações em reflorestamento, utilizando produtos da série Landsat. Já Oduro et al. (2020) estudaram as mudanças em área de florestas nativas, resultantes de impactos por atividades de petróleo e gás. Eles utilizaram imagens de três períodos (i.e., 1975, 1995 e 2017) da série Landsat, concluindo que houve redução de florestas com o aumento das referidas atividades.

Em relação aos usos dos produtos de mudanças de uso e cobertura para planejamento, Morais Dias (2019) relacionaram essas mudanças pretendendo quantificar a vazão de uma bacia; Lisboa (2019) realizou uma análise temporal para verificar a fragmentação florestal na Amazônia legal; Matos (2021) priorizou áreas protegidas e fragmentadas para a restauração da paisagem; e Valente et al. (2021) aplicaram a análise multicriterial para priorizar áreas para pagamentos de serviços ambientais.

Assim, pode-se dizer que, independente do método utilizado para a detecção de mudança, ela vem sendo empregada para diferentes fins, corroborando com as técnicas de SR. De acordo com Burger e Burge (2016), o uso e o desenvolvimento destas técnicas, são fundamentais, não apenas para o desenvolvimento da ciência, mas também para a solução de problemas práticos, principalmente para a criação de aplicativos robustos, seguros e rápidos para trabalhar em diferentes áreas de concentração. Pode-se assim dizer que a DM vem se tornando uma ferramenta de negócio (i.e., planejamento) para a tomada de decisão.

2.2. Monitoramento ambiental: importância e diagnóstico.

Segundo o relatório anual do MapBioma (2020) houve um crescimento de 14% de área desmatada em relação ao ano de 2019, em que no total foram

desmatados 1.385,3 mil ha, no qual a área da Mata Atlântica contribui em 23,9 mil ha. Sabendo-se que também o boletim da ONG SOS Mata Atlântica aponta que entre 2018-2019 houve um aumento de 27,2% de desmatamento em relação ao período anterior de 2017-2018 (SOS MATA ATLÂNTICA, 2019). Ou seja, um processo de fragmentação florestal em constante desenvolvimento.

Em suma, o monitoramento efetivo se faz necessário para subsidiar ações políticas no sentido de proteger e mitigar as ações deste crescente desmatamento. Além disso, este processo de perda de vegetação nativa, ocasiona a fragmentação florestal. Que de acordo com Forero et al. (2007), é um processo em que uma área de habitat é reduzida e dividida entre habitats diferentes do original.

Diante do diagnóstico da vegetação, Lindenmayer et al. (2008), evidenciaram que a fragmentação provoca diferentes impactos, tais como perda da biodiversidade, modificações das interações ecológicas, alterações da composição de fauna e flora (RIBEIRO et al., 2020), aumento da competição de espécies e impactos nos serviços ambientais (GRÊT-REGAMEY et al., 2017).

Lemes et al. (2016) afirmaram que a ocupação humana traz efeitos negativos para a conservação da biodiversidade, e que há risco de supressão dos fragmentos remanescentes de Mata atlântica para diversas atividades. Silva et al. (2018) analisaram a fragmentação da vegetação da mata atlântica por intermédio de diversos sensores remotos.

Em razão destes impactos da fragmentação florestal, muito tem se falado da priorização de áreas à conservação, o qual é um assunto em ascensão (TABARELLI e GASCON, 2005). Visto que esta priorização de áreas se torna uma alternativa de planejamento dentro de uma bacia hidrográfica, levando em conta diversos aspectos naturais espacializados (i.e., solo, água, infraestrutura etc.), além dos serviços ambientais oferecidos (NÉTO et al., 2020 e MESHRAM et al., 2019).

E de acordo com Mota (2008) mapas produzidos visando a prioridade, podem indicar áreas que devem ser preservadas, restauradas e aquelas que podem haver potencialização de uso. Desta forma. Silveira (2016), utilizando SIG, no âmbito de estudos ambientais, afirma que há técnicas eficientes e precisas, que geram informações de alto interesse, principalmente para tomadores de decisão.

Contudo as áreas prioritárias que visam preservar os recursos naturais em diferentes perspectivas, requerem diversas temáticas como a proteção de espécies em extinção (BROTTO, 2019), a área da saúde (RAMOS et al., 2020), os propósitos turísticos (NETO, 2021), os pagamentos por serviços ambientais (PICHARILLO, 2019), a conservação da biodiversidade em centros urbanos (RIBEIRO et al., 2021), a conectividade florestal (VANDERLEY-SILVA, 2021), dentre outros tantos temas abordados.

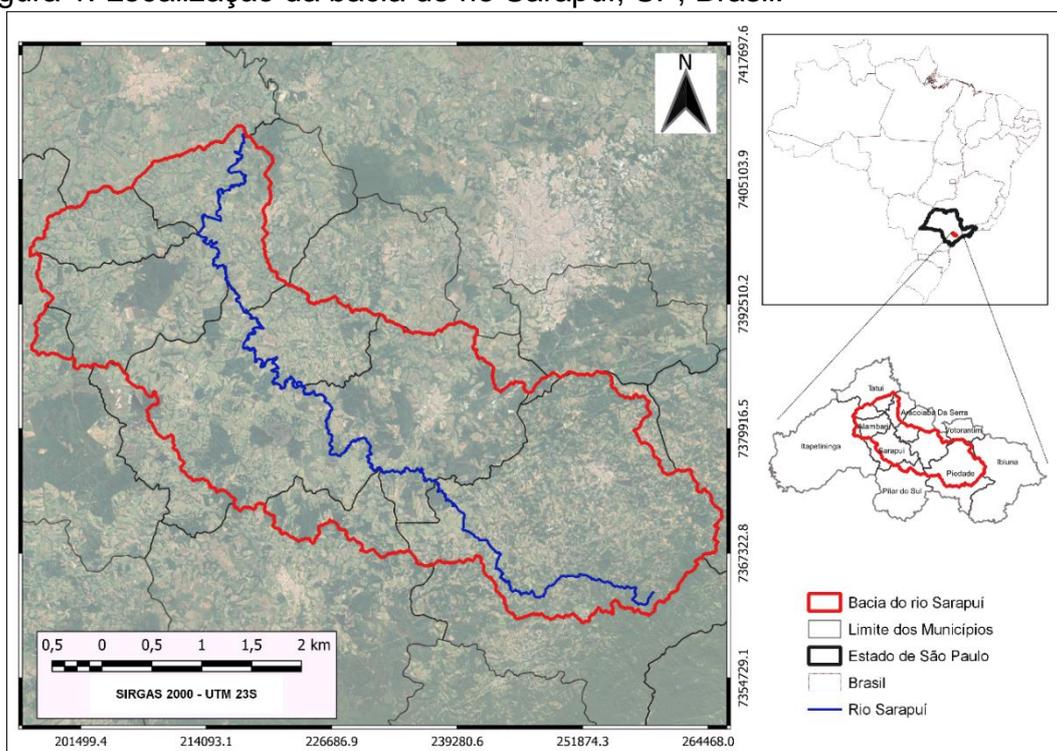
Para isso recursos como as geotecnologias, ferramentas de suporte para tomadas de decisão, vêm sendo aplicados em diversas regiões do Brasil para a detecção do desmatamento (CLEMENTE et al., 2020; COSTA et al., 2019; PORANGABA e AMORIM, 2019).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

Área de estudo foi a bacia do rio Sarapuí (Figura 1), localizada no estado de São Paulo, pertencendo à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (URGHI)10, estando entre as sub-bacias do médio e alto Sorocaba.

Figura 1. Localização da bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.



Fonte: O Autor (2022).

Com 1.551,42 km², a bacia do rio Sarapuí, abrange 10 municípios e é um afluente do Rio Tietê. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é Cwa (temperado úmido com invernos secos) com precipitação anual entre 1354,7 mm e 1807,7 mm (ALVARES et al., 2013).

A bacia, originalmente era coberta pelo Bioma Mata Atlântica, com fitofisionomia predominante de Floresta Ombrófila Densa (IBGE, 2009). De acordo com Soares et al. (2022) apresenta 20,37% de áreas de preservação permanente em relação à área total, sendo que 39,5% de sua floresta nativa estão localizadas em Áreas de Preservação Permanente e 47,5% das áreas de preservação estão descobertas por vegetação nativa em 2019.

3.2. Detecção de mudança

Foram avaliados três métodos de detecção de mudança (DM), sendo o primeiro a Análise de vetor de mudança (AVM), outro por índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e, por fim, propor-se o método da diferença de imagem direta (DID). Eles serão apresentados detalhadamente nos itens 3.2.2., 3.2.3 e 3.3.3, respectivamente.

Para aplicação utilizou-se imagens da série de satélites Landsat. Logo, foram adquiridas quatro imagens de anos distintos. Três delas do Landsat 5, com datas de passagens de 27/03/1988, 20/09/2000 e 04/02/2010, respectivamente. A imagem mais recente, com data de passagem de 28/01/2019, pertencente ao Landsat 8. As datas foram selecionadas em virtudes da presença de nuvens na área de estudo, ou seja, apenas imagens 100% sem presença de nuvens.

Os sensores do satélite da série Landsat, apresentam características diferenciadas ao longo de sua trajetória, em virtude das suas diferentes missões. Na Tabela 1 encontra-se as principais características dos sensores utilizados.

Como parte do processo de desenvolvimento dos métodos, determinou-se que o ano atual (Ia) se refere ao ano mais recente. Já o ano de referência (Ir) será o ano anterior para o qual se quer ter a detecção de mudança.

Tabela 1. Características dos sensores abordo da série de satélite do Landsat, utilizados nos métodos de DM, na bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Resolução Radiométrica
Landsat 5 (TM-)	Azul (0,45-0,52nm) Verde (0,50-0,60 nm) Vermelho(0,63-0,69nm) IP (0,76-0,90 nm) IM (1,55-1,75nm)	Mult: 30	16 dias	8 Bits
Landsat 8 (OLI-)	Azul Costeiro (0,43-0,45 nm) Azul (0,45-0,51 nm) Verde (0,53-0,59 nm) Vermelho (0,64-0,67 nm) IP (0,85-0,88 nm) IM (1,57-1,65 nm) Pan (0,50-0,68 nm)	Mult: 30	16 dias	16 Bits
		Pan: 15		

Fonte: NASA (2020).

Sendo: mult: multispectral; pan: pancromática; IP: Infravermelho Próximo; IM Infravermelho Médio; TM: Thematic Mapper e OLI: Operational Land Imager

3.2.1. Pré-processamento das imagens

Nesta etapa foram realizadas as correções radiométrica e atmosférica das imagens, a fim de comparar os resultados dos métodos com e sem correções de pré-processamento.

A primeira correção, a radiométrica, constitui-se na conversão de níveis digitais (i.e., imagens brutas) para radiância, sendo realizada por meio de uma interpolação linear (Eq. 1) como proposto e utilizado por U.S. Geological Survey (2015).

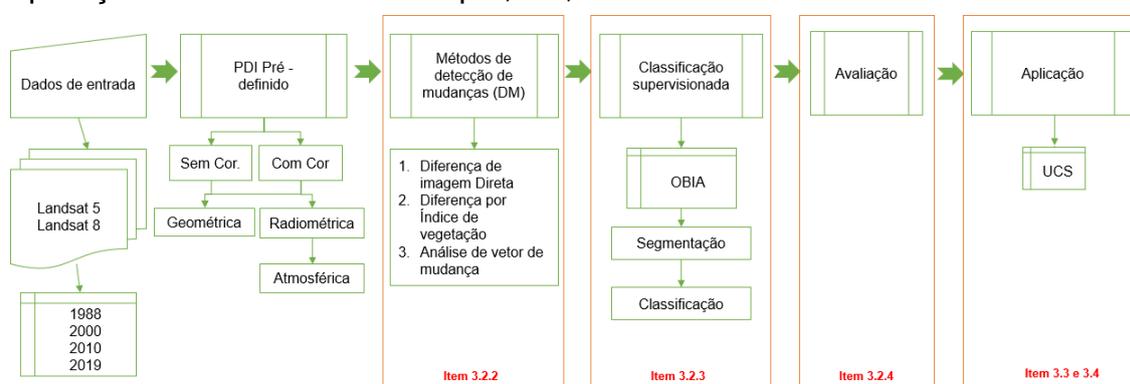
$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda}}{ND_{\max} - ND_{\min}} \right) * (ND - ND_{\min}) + L_{\min\lambda} \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo: L_{λ} : Radiância espectral aparente ($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$); $L_{\max\lambda}$: a radiância espectral máxima que o sensor é capaz de registrar ($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$); $L_{\min\lambda}$: é a radiância espectral mínima que o sensor é capaz de registrar ($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$); ND_{\max} : é o número digital correspondente a $L_{\max\lambda}$; e ND_{\min} : é o número digital correspondente a $L_{\min\lambda}$ do faixa de radiação espectral pós-calibração.

Em seguida para a correção atmosférica, utilizou o método desenvolvida por Felde et al. (2003), o qual é denominado de “*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*”, que consiste na minimização do efeito de aerossóis como, fumaça, bruma, nuvens, entre outros. De acordo com o autor, este algoritmo é fundamentado na física do código de transferência radiativa, sendo que ele corrige as regiões visíveis tendo como referência os comprimentos de onda infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas.

Para a detecção de mudança foram realizadas duas etapas, sendo elas os métodos de detecção de mudanças (item 3.2.2) seguidos da classificação supervisionada (item 3.2.3). Na Figura 2 detalha-se os trajetos realizados para se obter os resultados finais da detecção de mudanças da bacia do rio Sarapuí.

Figura 2. Modelo conceitual para o diagnóstico de detecção de mudança e aplicações na bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.



Sendo: OBIA: classificação supervisionada orientada ao objeto; UCS: uso e cobertura do solo e; Cor: Correção.

3.2.2. Métodos de detecção de mudança

Os três métodos de detecção de mudanças avaliados nesse estudo, bem como o desenvolvimento a partir deles, estão descritos a seguir (detalhados no item 3.2.3). Fazendo o uso destes procedimentos ou de outros métodos, pode-se identificar ações como alterações do uso do solo (PERUZZO et al., 2019), desmatamento (MAURUANO et al., 2019), queimadas (JUNIOR et al., 2018), dentre outras aplicações.

3.2.2.1. Análise de Vetor de mudança - AVM

O primeiro método avaliado foi a análise de vetor de mudança, denominado neste estudo como AVM, o qual se utiliza de dois produtos para seu

desenvolvimento. As bandas utilizadas para a geração da direção e magnitude foram a verde e a vermelha.

O primeiro é a direção (eq. 2) dos dados de entrada (i.e., bandas do sensor Landsat) e o segundo é a magnitude (eq. 3) que se tem desses dados (i.e., determinada pela distância euclidiana).

$$D = Ia - Ir = \begin{pmatrix} Ia1 - Ir1 \\ Ia2 - Ir2 \\ IaBN - IrBN \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 2}$$

$$M = \sqrt{(B1_{IA} - B1_{IR})^2 + \dots + (BN_{IA} - BN_{IR})^2} \quad \text{Eq. 3}$$

Sendo: D= Distância; M= magnitude; BN= banda utilizada para o método; Ia= Imagens do ano atual para o método; e Ir= Imagens do ano de referência.

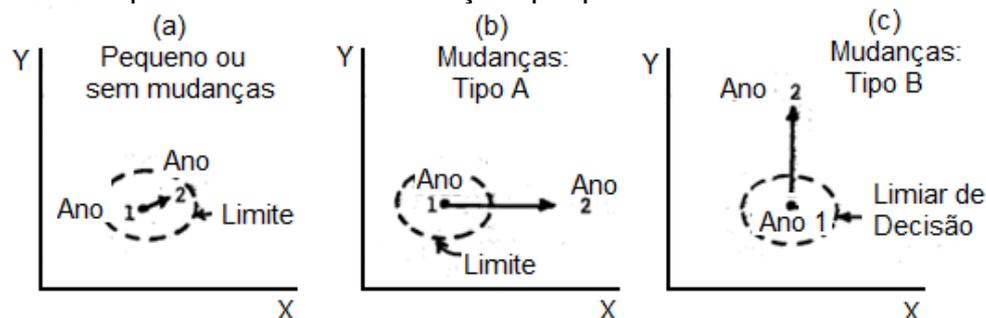
Este método foi desenvolvido por Malila (1980), com a proposta de detectar alterações do uso e cobertura do solo em dois momentos, colheita e rebrota de cultivos florestais. Os termos utilizados pelo autor remetem-se o quando se perdeu e ganhou vegetação, respectivamente. Assim, neste estudo será utilizado o termo perda e ganho, no qual a *perda* significa que no ano referência (i.e., mais antigo, Ir) para o ano atual (i.e., mais novo, Ia) houve supressão de vegetação, seja arbórea ou rasteira. Já o *ganho*, significa que do ano de referência para o atual, houve um acréscimo de área.

Em síntese o conceito do AVM é simples, pois, em seguida das análises da magnitude e direção, aplica-se um limiar de classificação, conseqüentemente a mudança é detectada quando se tem valores que excedem esse limiar (MALILA, 1980).

Diante do conjunto de dados, pode-se interpretar a distância (Figura 3), conforme ocorre a mudança de direção do vetor, a qual demonstrará a mudança em determinada ocasião. A Figura 3a ilustra um caso em que pequena mudança ou mesmo nenhuma seria detectada, enquanto as Figuras 3b e 3c ilustram casos de mudanças expressivas e definitivas.

Essas duas últimas figuras ilustram, também, a outra metade das informações contidas no vetor de mudança, ou seja, sua direção. Entretanto, para este estudo na avaliação do AVM, utilizou a magnitude para verificação do comportamento dos dados.

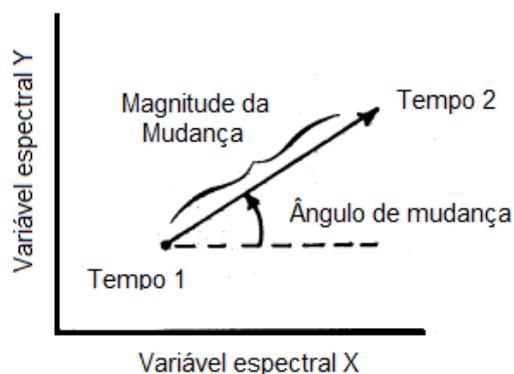
Figura 3. Comportamento das mudanças que podem ocorrer no método AVM.



Fonte: Malila (1980).

Desta maneira, quanto maior a magnitude maior será a possibilidade de mudança ocorrer. E para identificar o ângulo de mudança, de acordo com Malila (1980), pode-se avaliar essa amplitude por meio de gráficos (Figura 4) ou de forma numérica. O intuito é definir a magnitude de diferença das duas variáveis espectrais nos dois tempos (i.e., imagens).

Figura 4. Comportamento da Magnitude e distância do método AVM.



Fonte: (MALILA, 1980)

Lorena et al. (2002), utilizaram a imagem de brilho e verde, com o limiar de classificação definido de acordo com o ângulo. Assim, quando se tinha valor de ângulo igual a 0° havia a indicação de não existência de mudança; já entre 0° e 90° havia indicação que houve perda de biomassa; de 90° a 180° indicação de rebrota; de 180° a 270° a presença de água ou queimada; e de 270° a 360° que estava ocorrendo a colheita florestal. Entretanto, para este estudo os limiares de mudanças estão descritos no item 3.2.3, pois após a aplicação deste algoritmo, ainda se realizou uma classificação supervisionada.

3.2.2.2. Diferença por índice de vegetação normalizada – NDVI

Proposto por Rouse et al. (1973), o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) apresenta amplitude de variação de -1 a 1. Assim, de acordo com Carlson e Ripley (1997), Shimabukuro (1998) e Jensen e John (2009) quanto mais próximo do valor 1, maior a possibilidade da presença da vegetação (i.e., mais densa é a biomassa) e o inverso, quanto mais próximo de -1, maior o indicativo de solos expostos (i.e., menos densa).

No presente estudo, denominado com DM_{NDVI} , este método foi realizado pela subtração de imagem, utilizando como dados de entrada o produto NDVI, nos dois tempos e, posteriormente, calculou-se a diferença entre eles (Eq.4). Em seguida, definiu-se um limiar de classificação (descrito no item 3.2.2), visto que o produto final desta equação passou por uma classificação supervisionada.

$$DM_{NDVI} = ((NDVI)_{Ia} - (NDVI)_{Ir}) \quad \text{Eq. 4}$$

Sendo: NDVI= Índice de vegetação da diferença normalizada; Ia= Imagens do ano atual para o método; e Ir= Imagens do ano de referência.

3.2.2.3. Diferença de Imagem Direta - DID

E por fim, o método de diferença de imagem direta, denominado nesse estudo como DM_{DID} . Ele foi desenvolvido para que haja uma classificação direta das imagens, utilizando a banda do infravermelho próximo (NIR). Para a obtenção da detecção de mudança, com este método, desenvolveu-se a Eq.5 e aplicou-se um limiar de classificação apresentado no item 3.2.2. Visto que o produto final desta equação também passou por uma classificação supervisionada.

$$DM_{DID} = \left(\frac{Ia - Ir}{Ia + Ir} \right)^2 \quad \text{Eq. 5}$$

Sendo: Ia= Imagens do ano atual para o método; e Ir= Imagens do ano de referência.

3.2.3. Classificação supervisionadas das imagens

Foi aplicado a metodologia de classificação supervisionada orientada ao objeto. Furtado et al. (2013), discorrem que a classificação supervisionada orientada ao objeto (termo em inglês *Object Based Image Analysis (OBIA)*), é

dividida por duas etapas, primeiramente a segmentação da imagem, e posteriormente a classificação.

Para a classificação da bacia do rio Sarapuí utilizou-se OBIA com a segmentação baseada em fronteiras. Segundo Glasbey (1995), realiza este processo, primeiramente separando os aspectos de borda e não borda, posteriormente aplicando um filtro, no qual os não bordas são incluídas nas mesmas categorias.

Desta forma, levando em conta que a segmentação ocorre em virtude dos aspectos espectrais, espaciais e textura similares e, que cada método (i.e., AVM, DM_{NDVI} e DM_{DID}) apresenta dados de entradas diferentes, realizou-se avaliações visuais para definição dos melhores parâmetros.

Já a classificação da imagem segmentada foi realizada com um algoritmo não-paramétricos o Support Vector Machine (SVM). HUANG et al. (2002), Foody e Mathur (2004), Pal e Mather (2005) estudaram diversos algoritmos de classificação (e.g., redes neurais, árvores de decisão e *Random Forest* e SVM) e apontaram que o SVM se iguala ou até ultrapassa os demais classificadores.

Desta forma, pela análise do histograma da distribuição de frequência dos pixels de cada produto estudado (item 3.2.1), foram determinados os limiares para a detecção de mudança.

Estes limiares de classificação visam separar os valores absolutos de mudança dos demais valores das imagens. Para a obtenção dos limiares de classificação primeiramente realizou as amostras de treinamento. Para isso, mediante a análise visual e realizando a digitalização em tela dos Ia e Ir, delimitou as amostras das duas classes perda e ganho de vegetação.

3.2.4. Estatísticas aplicadas à detecção de mudanças

Nesta etapa, inicialmente, realizou-se uma reamostragem dos elementos de mudanças isolados, ou seja, os resultados dos métodos de detecção de mudança foram padronizados em relação a resolução espacial do satélite Landsat (i.e., 30 m), seja no sensor TM ou OLI, para isso foram excluídas as áreas menores e igual a 9 pixels (i.e., 8.100 m²).

As validações dos resultados foram realizadas utilizando pontos de controle para a verificação da veracidade em campo dos métodos estudados. O número ideal significativo para a boa representação da área estuda, foi admitida

conforme a Eq. 6, em que a área total da bacia foi o limitante. Sendo 95% de grau de confiança e 5% de margem de erro, em que o escore z é igual a 1,96.

$$TA = \frac{\frac{z^2 * p(1 - p)}{e^2}}{1 + \left(\frac{z^2 * p(1 - p)}{e^2 N}\right)} \quad \text{Eq. 6}$$

Sendo: TA: tamanho da amostra, N: tamanho da população (área bacia); e: margem de erro: Z= escore Z.

Esses pontos de controle foram especializados da seguinte forma, 80% dedicados as áreas de mudanças pelos métodos (i.e., mudanças corretas e falso positivo) e 20% nas áreas externas as regiões de mudanças (i.e., verificação de falsos negativos). Sendo que dentro de cada área os pontos foram distribuídos aleatoriamente ao acaso.

Foram computados, os falsos positivos (fp) e negativos (fn), ou seja, os erros, onde não houve mudanças reais, entretanto que o método classificou como mudança (i.e., fp) e, ainda, erros onde houve mudanças reais, entretanto o método classificou como se não houvesse mudanças (i.e., fn). Este procedimento foi realizado por interpretação dos padrões nas imagens orbitais em cada ano de referência.

Desta maneira, o método que apresentou maiores porcentagens de acertos, e menores porcentagens de falsos positivos e negativos, foi o recomendado como o método ideal para a detecção de mudança do uso e cobertura do solo em bacias hidrográficas agrícolas. Ainda, que permitiu a detecção de maneira mais simples das áreas que obteve alteração de uma data para outra.

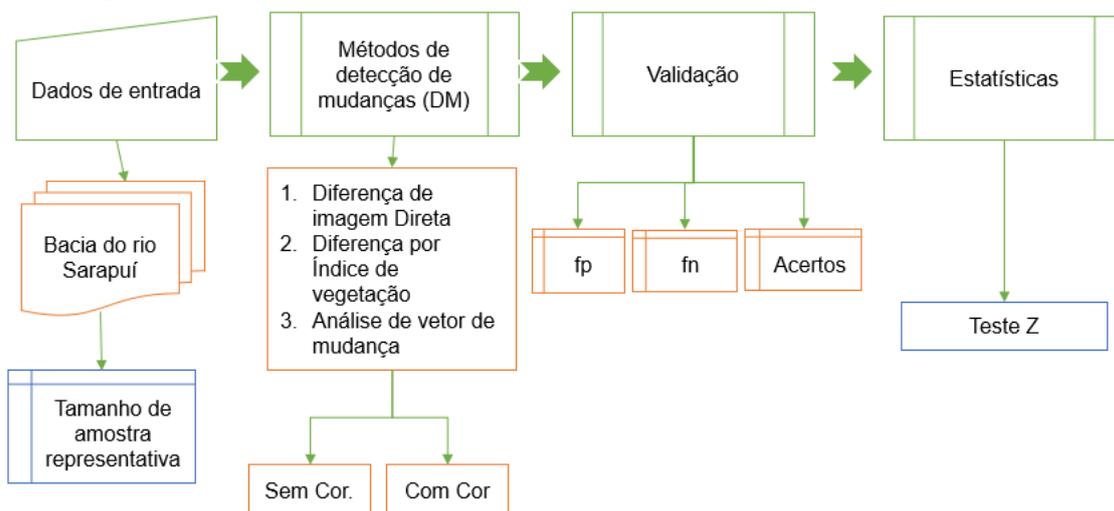
Realizou-se, ainda, a avaliação de mapas temáticos (i.e., produtos da classificação), os quais foram comparado em pares, por meio de uma matriz de confusão (CONGALTON e GREEN, 1999 e LILLESAND et al., 2004). Calculou-se o índice Kappa (K), que é amplamente utilizado nas avaliações de resultados de classificações de mapas temáticos (LEE et al., 2001; LIM et al., 2007; MENESES e ALMEIDA, 2012). Proposto por Cohen (1960) o K varia de 0 (concordância nula) a 1 (concordância perfeita).

Para avaliação do K, foram utilizados os dados de erros e acertos dos métodos de detecção de mudanças estudados, sendo que as classificações de

mudanças foram as classes (i.e., 1988/2000, 2000/2010 e 2010/2019), e os dados de referências foram os acertos e os erros (i.e., falsos negativos e positivos).

Além das avaliações do K para ambos os métodos se realizou o teste de significância estatística, Teste Z para a comparação dos três métodos avaliados no estudo. Na Figura 5 estão as etapas necessárias para a avaliação dos métodos de detecção de mudança.

Figura 5. Modelo conceitual para a avaliação dos métodos de detecção de mudança da bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.



Sendo: cor.: correção; fp: falsos positivos; fn: falsos negativos

De posse dos produtos finais de detecção de mudança, ou seja, com o método de DM que se destacou significativamente dos demais, deu-se início as demais etapas da metodologia (i.e., item 3.3 e 3.4), que consistiu na quantificação e contextualização das áreas de mudanças reconhecidas, ou seja, aplicação das áreas de mudanças detectadas.

3.3. Quantificação do ganho e perda de vegetação

Inicialmente realizou a quantificação por data, ou seja, verificou em que período avaliado houve mais perdas e ganhos de vegetação, posteriormente realizando uma análise de intersecção, para verificar as áreas que ocorrerão mudanças no uso e cobertura do solo em todos os períodos estudados.

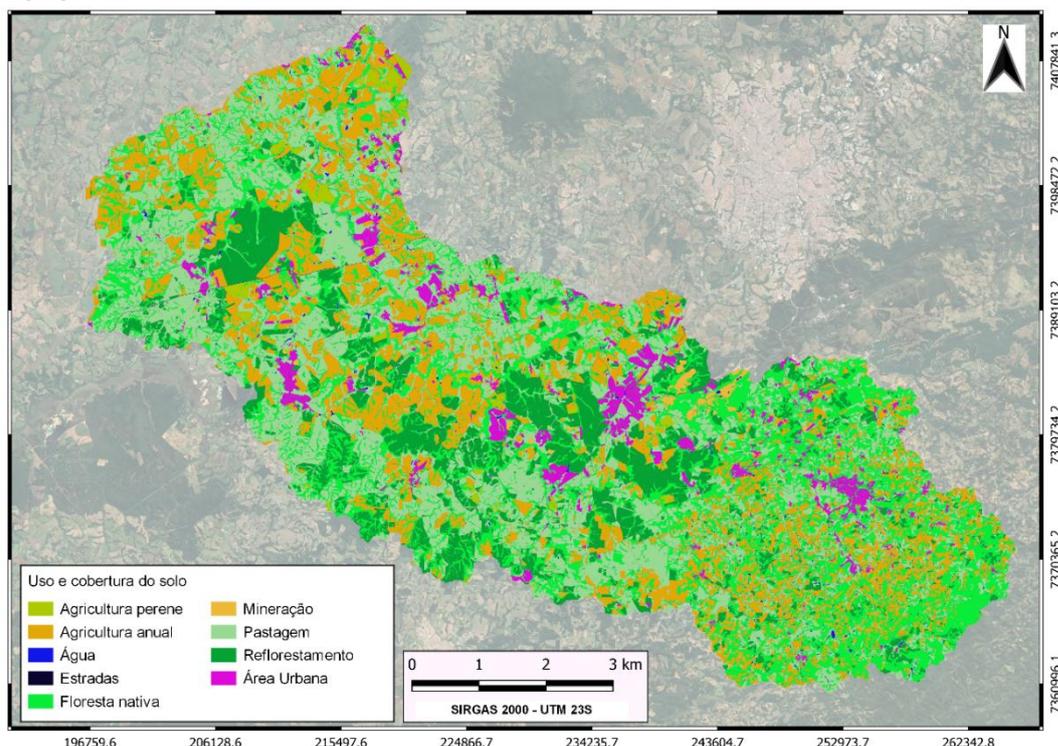
Para as áreas de detecção de mudança, o método utilizado foi qual apresentou o melhor resultado significativo. E para a quantificação da perda de

vegetação, foi realizado a somatória destas áreas de mudança desde o ano de início do estudo ao ano atual, ou seja, 1988 até 2019.

Nesta etapa, primeiramente foi realizado a classificação do uso e cobertura do solo da bacia do rio Sarapuí. E este processo foi realizado no âmbito do Projeto Regular (FAPESP 2018/21612-8), intitulado Estruturação de processo decisório, visando à priorização de áreas em Programas de Serviços Ecosistêmicos Hídricos. Vale ressaltar que a autora da tese também integra a equipe do projeto e por sua vez concatenou e executou as classes de uso e cobertura do solo, assim como realizou o processo de verificação em campo (i.e., validação).

Este mapeamento possui exatidão global de 85,30% e foi produzido a partir de imagens do sensor Multiespectral Imager (MSI) do satélite Sentinel-2A, com resolução espacial de 10 metros (SOARES et al., 2022). Utilizou-se a classificação por digitalização em tela, tendo como classes à agricultura anual, agricultura perene, floresta nativa, floresta plantada, pastagem, área urbana, mineração, malha viária e rede de drenagem (Figura 6).

Figura 6. Uso e cobertura do solo da bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil do ano de 2019.



Fonte: Projeto Regular (FAPESP 2018/21612-8) publicado em Soares et al. (2022).

Mesmo com as diferenças de resolução espacial dos sensores utilizados, Sentinel (i.e., 10 m – Uso e cobertura do solo) e Landsat (i.e., 30 m - método de detecção de mudança), houve a comparação visto que a maior resolução espacial é no uso e cobertura, dando maior detalhamento da ocupação do solo.

A quantificação da perda e do ganho de vegetação, a qual permite avaliação do processo de fragmentação florestal, foi realizada utilizando as áreas de detecção de mudança aplicada no uso e cobertura do solo.

Para isso, todas as mudanças (i.e., perdas e ganhos de vegetação) obtidas desde 1988 a 2019 pelo processo de DM (item 3.2.) foram computadas e relacionadas com o uso e cobertura do solo. Tendo como ênfase às perdas de vegetação em área de floresta nativa para usos antrópicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diante da utilização dos métodos de detecção de mudanças foram observadas mudanças de uso e cobertura do solo. E a determinação do método mais adequado de DM (item 3.5) é de suma importância para a quantificação das perdas e ganhos de floresta nativa (item 3.6), assim podendo inferir em um planejamento posterior.

4.1. Avaliação dos métodos de detecção de mudança

Inicialmente para a determinação do método mais adequado, foi verificado os valores ótimos de segmentação e mesclagem para a classificação supervisionada orientada ao objeto na bacia do rio Sarapuí. E verificou-se que estes valores mudam de forma a modificar o procedimento de DM, visto que a composição matemática dos produtos resultantes faz com que haja ganho ou perda na questão geométrica dos pixels, dificultando o classificador. Que de acordo com Blaschke et al. (2010) e Whiteside et al. (2011), este procedimento se diferencia por agrupar os pixels em regiões.

Portanto, os valores ótimos de segmentação e mesclagem para a classificação dos métodos proposto de detecção de mudança foram 40, 30 e 20 para os fatores de segmentação (*Edge*), e 60, 40 e 60 para o nível de mesclagem para os AVM, DM_{NDVI} E DM_{DID}, respectivamente. Segundo Furtado et al. (2013)

a classificação supervisionada orientada ao objeto facilita a interpretação das imagens, sendo que informações tais como, forma, textura e outras são adicionadas, levando assim este procedimento a se aproximar a fotointerpretação humana.

Esses valores foram obtidos por tentativas e acertos (i.e., análise visual), e foram baseados em estudos como de Soares et al. (2016), o qual utilizaram a segmentação de 50 e o nível de mesclagem 70 para o sensor TM do Landsat-5 e Garofalo et al. (2015), que utilizaram segmentação de 10 e nível de mesclagem de 60 para o sensor OLI do Landsat-8, nortearam os valores utilizados para aplicação nesta área.

Com a utilização das amostras de validação, computou os valores, tanto para perda como ganho, e a partir destes resultou nos parâmetros para os limiares de classificação do algoritmo SVM, apresentados na Tabela 2 os intervalos para cada classe de cada método avaliado.

Tabela 2. Limiares de classificação para os métodos estudados para bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.

Método	Tipo de Mudança	1988-2000	2000-2010	2010-2019
AVM com correção	Perda	200° - 240°	210° - 225°	205° - 255°
	Ganho	20° - 40°	20° - 40°	15° - 50°
AVM sem correção	Perda	205° - 245°	195° - 245°	35° - 45°
	Ganho	10° - 30°	25° - 70°	38° - 49,5°
DM_{DID} com correção	Perda	0,1 - 1	0 - 0,55	0,028 - 1
	Ganho	0 - 0,006	0,7 - 1	0 - 0,006
DM_{DID} sem correção	Perda	0,06 - 1	0 - 0,007	0,986 - 1
	Ganho	0 - 0,0025	0,09 - 1	0,952 - 0,976
DM_{NDVI}	Perda	(-1) - (-0,35)	(-1) - (-0,15)	(-1) - (-0,15)
	Ganho	0,15 - 1	0,4 - 1	0,4 - 1

Sendo: AVM: análise de vetor de mudança; DM_{DID}: Detecção de Mudança por diferença de imagem direta; DM_{NDVI}: Detecção de mudança por Índice de vegetação da diferença normalizada.

Constatou-se que para o AVM, tanto o método com correção e sem correção, não se diferenciam na amplitude dos dados, em relação aos demais DM. Entretanto, observa-se que ocorreram disparidades de valores tanto para o AVM quanto para o DM_{DID} em relação aos limiares de classificação, para os anos de 2010 e 2019 sem correções. Ganem et al. (2019) avaliaram métodos de correção atmosférica e concluíram que imagens com as correções, apresentam exatidão, de modo geral, mais elevadas do que para as imagens sem correções.

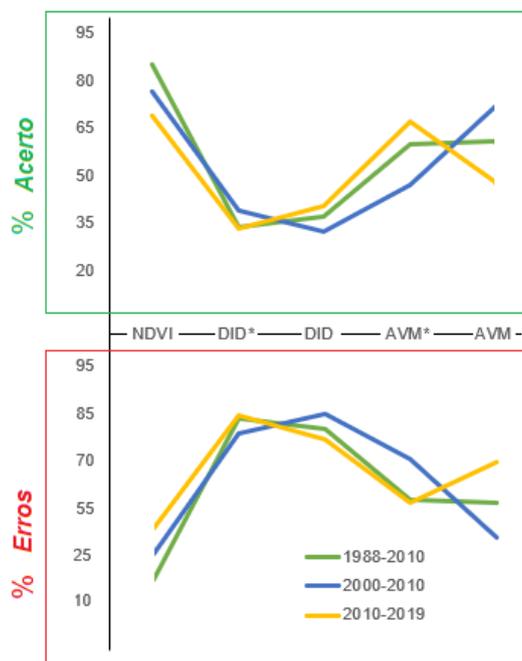
Outro fator importante é que as alterações dos limiares de classificação estão relacionadas aos sensores. Ou seja, esta diferença, pode ser por conta da particularização dos sensores utilizados no processo (i.e., OLI e TM). No estudo de Bezerra et al. (2018) houve a indicação dessa diferença em função da diferença de amplitude das bandas de cada sensor.

Mediante aos valores obtidos para as amostras de treinamentos (i.e., limiares de classificação), identificou-se que para o DM_{NDVI} os valores próximos negativos são de perda, enquanto os positivos de ganho de vegetação. Entretanto, cada área de estudo terá um valor ideal e específico para cada método proposto, assim cabendo ao analista encontrá-la para sua região de aplicação.

Espacializados os 385 pontos de validação (Eq. 6), pode observar nas Figura 7 que o método com maior porcentagem de acerto foi o DM_{NDVI} , seguido por AVM sem correções. E com consequência o DM_{NDVI} apresentou menor erro, entretanto, o AVM sem as correções apresentou valores inferiores ao com as correções.

O método DM_{NDVI} se apresentou melhor que os demais, ou seja, com maiores acertos e menores erros, seguido de AVM e DM_{DID} . Considerando todos os métodos avaliados, a média geral entre os anos de 94% de acerto. Neta et al. (2018), verificaram resultados de anomalias na diferença de imagens de NDVI e concluíram que o método é uma alternativa para o monitoramento e evolução temporal de mudanças do uso e cobertura do solo.

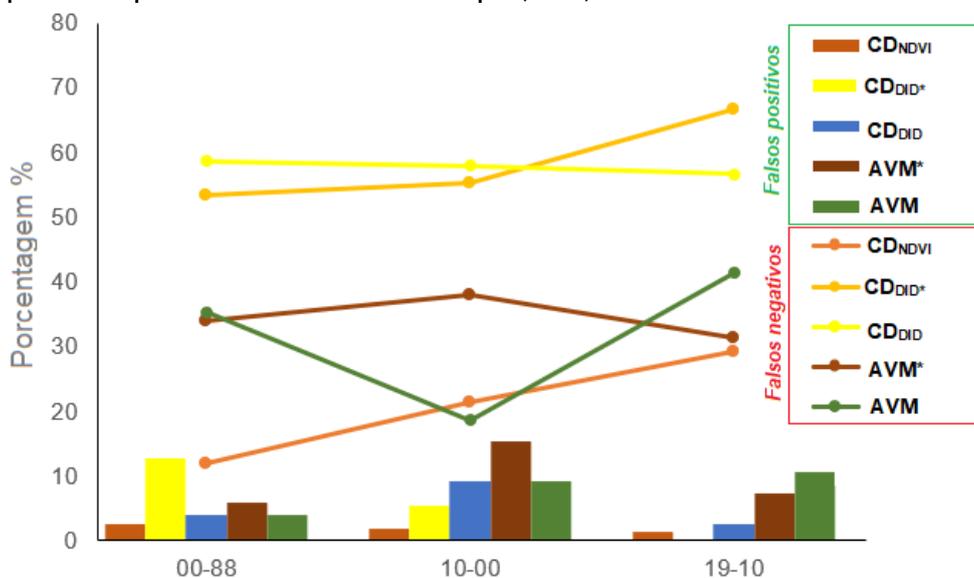
Figura 7. Perfil dos acertos e erros dos métodos para a bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.



Sendo: *método com correção radiométrica e atmosférica.

Quando comparado os erros de forma geral, percebe-se que o DM_{NDVI} além de apresentar os maiores acertos, apresenta os menores erros. E quando comparado os falsos positivos e negativos (Figura 8), consequentemente, o DM_{NDVI} apresenta fp e fn menores que os demais métodos.

Figura 8. Comportamento dos falsos positivos e negativos para os métodos de DM aplicados para a bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.



Sendo: *método com correção radiométrica e atmosférica.

Nota-se na Figura 8, que em todos os métodos os fp são os erros coletivos, ou seja, áreas em que não se deveria ter mudanças e passaram a ter. Desta forma, fazendo uma relação entre os acertos e os erros, pode-se dizer que o melhor método é aquele que apresenta mais acerto sem fp e fn. Portanto, o DM_{NDVI} continua apresentando-se como superior, seguido de DM_{DID} e AVM com e sem correção.

Comparando estatisticamente os métodos, por meio do teste Z, verificou-se que se os dados de fp e fn, e acertos estão fazendo diferença no mapa final. De acordo com Congalton e Green (1999) valores de Z menores que 1,96 (i.e., com 95% de confiança) e 2,57 (i.e., 99% de confiança) indica que as matrizes são iguais, e acima desses valores são consideradas diferentes.

Na Tabela 3 estão os respectivos valores obtidos para o teste z, quando se comparou os métodos. Em suma, os métodos apresentam diferenças entre si estatisticamente, menos quando comparados com suas próprias versões corrigidas. Em que se pode verificar o AVM e DM_{DID} apresentaram 1,29 e 0,42 respectivamente, valores indicativos que as matrizes são iguais com 95% e 99% de confiança nesta ordem.

Entretanto, quando se trata dos métodos baseados em imagens em que se realizou pré-processamento, não se observou diferenças significativas para os métodos AVM e DM_{DID} .

Tabela 3. Teste Z de comparação estatística entre os métodos avaliados para a bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.

Métodos	AVM*	CD_{NDVI}	CD_{DID}*	AVM	CD_{DID}
AVM*	-	6,95	-6,25	1,29	-5,82
CD_{NDVI}	-	-	13,77	5,61	13,3
CD_{DID}*	-	-	-	7,59	0,42
AVM	-	-	-	-	-7,16
CD_{DID}	-	-	-	-	-

Sendo: *método com correção radiométrica e atmosférica

Estes resultados contrariam Song et al. (2001), que afirmaram que a correção atmosférica pode ou não influenciar nos resultados de classificação e a mesma é necessária quando se realiza uma comparação entre sensores ou

entre datas de aquisições diferentes. Weiss et al. (2015), também afirma que estas correções para o Landsat-8 são imprescindíveis para a minimização dos efeitos, o que poderá interferir no resultado.

Hovi et al. (2017) e Rautiainen et al. (2018) estudaram a diferença na classificação em produtos de NDVI para a classificação de vegetação com e sem correção. Eles verificaram que a correção atmosférica pode influenciar na iluminação da imagem, alterando a quantidade de sombra, ou seja, introduzindo mudanças na classificação.

Portanto, o método que melhor expressou as mudanças representativas de uso e cobertura do solo, foi o DM_{NDVI} , mesmo sabendo-se que se diferenciou estatisticamente dos demais. O DM_{NDVI} destaca-se por apresentar menores erros, seja de falsos positivos ou negativos.

Visando a quantificação e delimitações das áreas de mudanças, o método DM_{NDVI} foi utilizado para a aplicabilidade de avaliação do uso e cobertura do solo, assim como de áreas de prioridades à conservação florestal na bacia do rio Sarapuí, como descrito nos itens que seguem.

4.2. Quantificação das perdas e ganhos de vegetação

Os métodos de DM suportam, assim com o projeto PRODES (INPE, 2021) e MAPBiomas (MAPBIOMAS, 2022), planejamentos futuros, principalmente relacionados à conservação florestal. Nota-se na Tabela 4 que na bacia do rio Sarapuí nos últimos 30 anos 18,7 km² foram referentes a perda de vegetação e apenas 4,6 km² de ganho, ou seja, houve mudança de uso e cobertura do solo em 1,5% de sua área total.

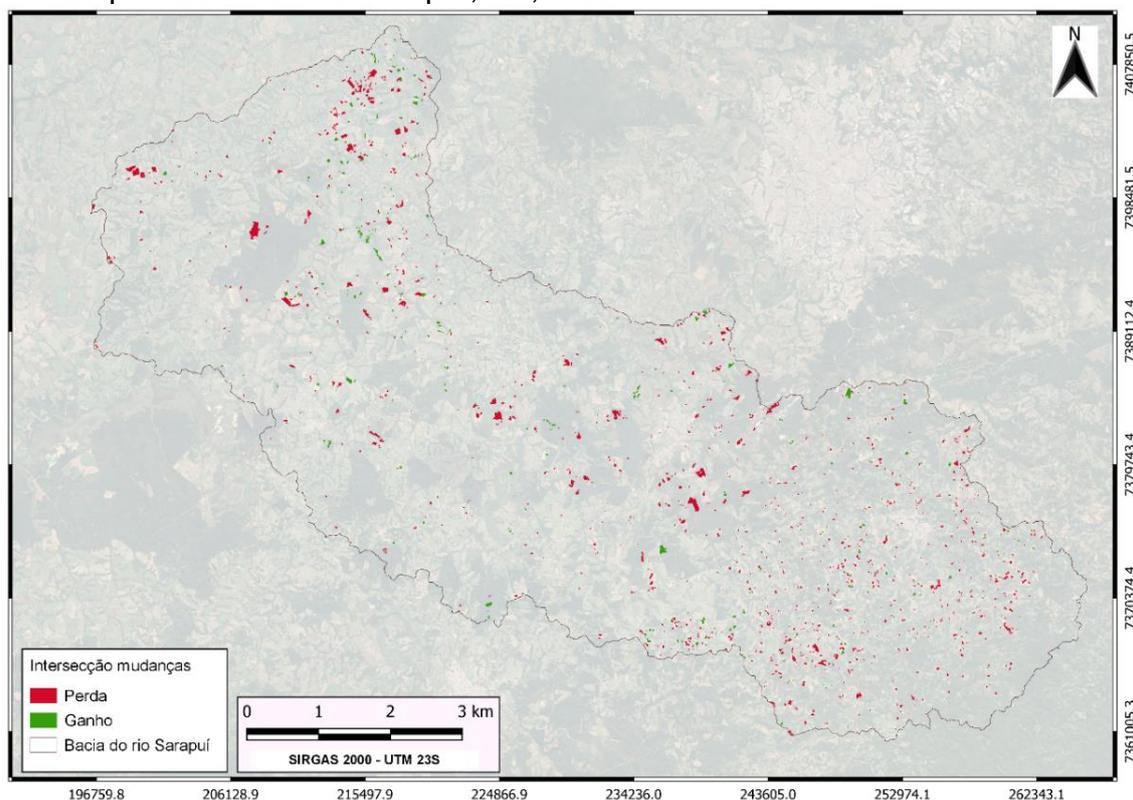
Tabela 4. Perda e ganho de vegetação no DM_{NDVI} para a bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil

Ano/Mudanças	Perda (km²)	Ganho (km²)	Total (km²)	% da área total
00-88	123,23	43,05	166,28	10,72
10-00	36,63	119,16	155,79	10,04
19-10	103,39	25,02	128,41	8,28
Intersecção dos anos	18,77	4,64	23,41	1,51

Entretanto, como se trata de uma bacia agrícola, nota-se que houve perdas de vegetação nos anos de 1988 para 2000 e de 2010 para 2019, e ganhos de vegetação no ano de 2000 para 2010. Este fato pode ter como influencia os inícios e encerramentos de ciclos florestais e agrícolas. E um dos questionamentos atuais, é se realiza-se pagamentos para proprietários que visam a conservação (i.e., ganhos) ou não (i.e., perda) de vegetação, pois muitas das vezes compensa conservar as áreas do que destruí-las com outros usos (PICHARILLO et al., 2019).

A Figura 9 destaca a distribuição espacial das perdas e dos ganhos com o método DM_{NDVI} . De acordo com essa figura, as maiores mudanças encontram-se ao norte e centro da bacia, enquanto as menores ao sul.

Figura 9. Distribuição espacial da intersecção das áreas de mudanças do método DM_{NDVI} para bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.



Fonte: O Autor (2022).

Para esta avaliação utilizou a somatória das mudanças desde 1988 a 2019 e pode-se observar na Tabela 5 que, de forma geral, 22,12% da área total da bacia apresenta mudanças do uso e cobertura do solo nos decorreres dos últimos 30 anos. Apenas 6,14% da bacia teve incremento de vegetação, seja ela

florestal nativa, reflorestamento ou plantio de cultivos anuais ou perenes. Que conforme Scarano e Ceotto (2015) a perda de habitat naturais é ocasionada, também, pela urbanização, industrialização além de expansão agrícola.

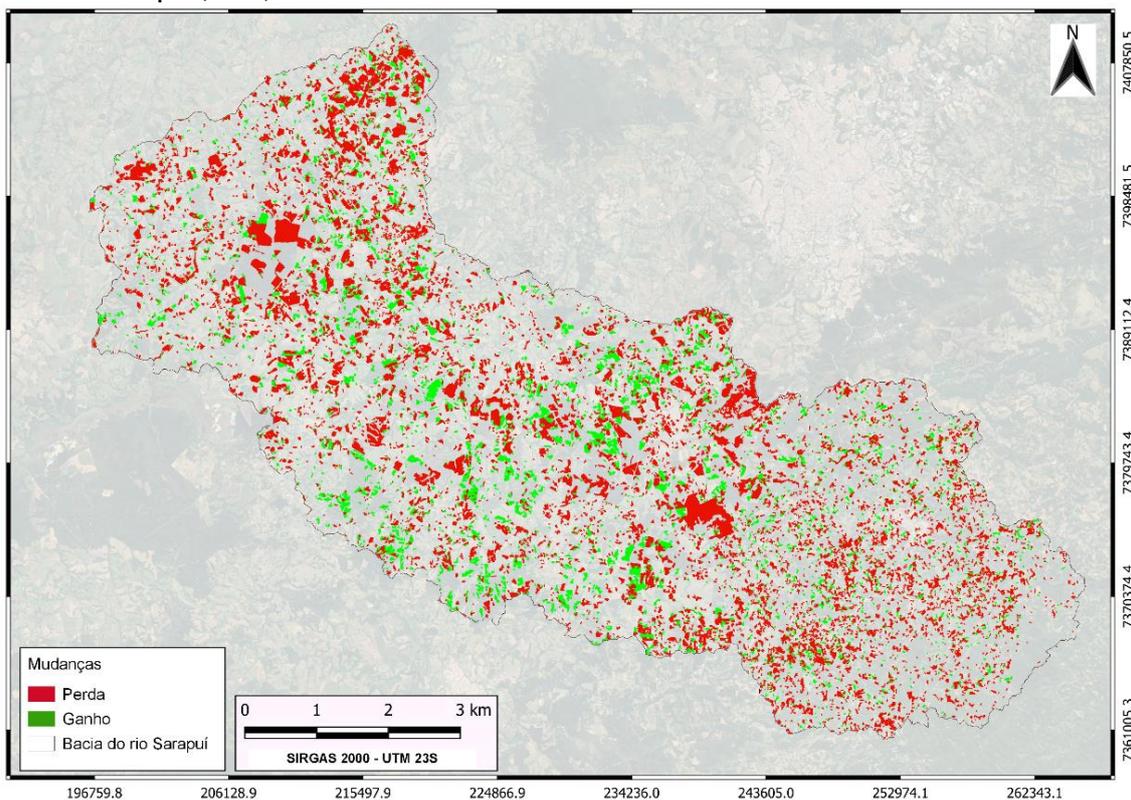
Tabela 5. Perda e ganho de vegetação das mudanças de 1988 a 2019 na bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.

Uso e Cobertura do solo	Perda (km²)	Perda (%)	Ganho (km²)	Ganho (%)	Total (km²)	Total (%)
Pastagem	58,80	3,79	18,70	1,21	77,50	5,00
Floresta nativa	13,00	0,84	8,20	0,53	21,30	1,37
Reflorestamento	49,60	3,20	38,40	2,48	88,00	5,67
Agricultura anual	101,70	6,56	25,20	1,62	126,90	8,18
Mineração	4,60	0,30	0,30	0,02	4,90	0,32
Área urbana	13,00	0,84	1,30	0,08	14,20	0,92
Agricultura perene	5,80	0,37	2,90	0,19	8,80	0,57
Estradas	1,20	0,08	0,20	0,01	1,50	0,10
Total	247,7	15,97	95,2	6,14	343,10	22,12

Nos últimos 30 anos, o processo de perda de floresta nativa foi de 13,00km², ou seja, 0,84% da área de estudo. Sabendo-se que a bacia é de uso agrícola, tendo usos do solo como agriculturas e reflorestamento, pode-se inferir que também podem ter ocorrido perdas e ganhos conforme o ciclo de vida das culturas ali pertencente (Figura 10). No entanto, se tem também a questão de e alteração da cobertura do solo. Safar et al. (2020) afirmaram que a Mata Atlântica é uma das florestas mais ameaçadas e, conforme, os resultados obtidos neste estudo e corroborando com Ferreira et al. (2019) o bioma vem sendo devastado, principalmente pelo processo de urbanização.

Quando se trata de perda de vegetação, não se compreende somente florestas nativas, como também todo tipo que apresenta assinatura espectral de vegetação, desde a análise de reflectância de folhas isoladas até o comportamento espectral de dosséis complexos. Para Epiphanyo et al. (1996) a vegetação é um dos alvos mais complexos para o sensoriamento remoto, pois apresenta várias propriedades de reflexão foliar em uma mesma planta, ou seja, múltiplos componentes refletoras.

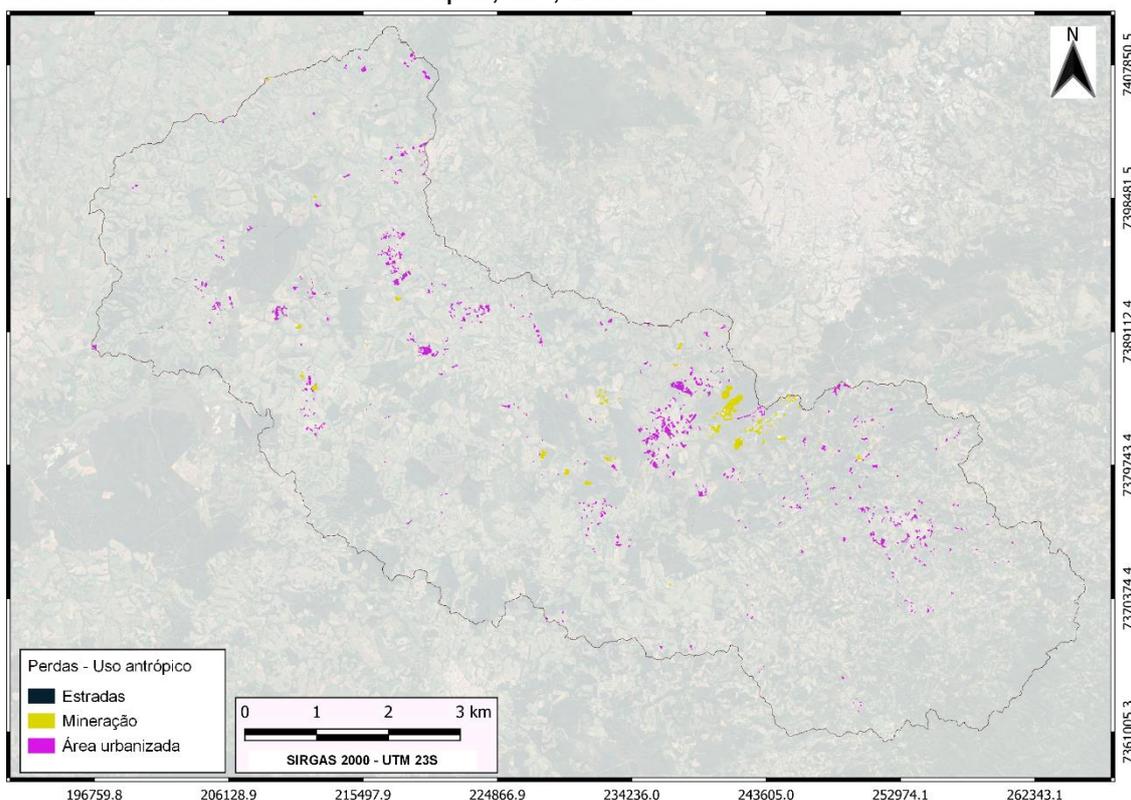
Figura 10. Mudança no uso e cobertura do solo nos últimos trinta anos na bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.



Fonte: O Autor (2022).

Desta forma, pode-se visualizar na Figura 11, que em 1,21% (i.e., 18,80 km²) de área dentro da bacia do rio Sarapuí houve perda de vegetação efetiva, ou seja, locais onde existia vegetação passaram a ter outra cobertura do solo antrópica (i.e., urbano, estrada e mineração). Sabendo-se que 60% da população brasileira reside em área de domínio de mata atlântica (SCARANO e CEOTTO, 2015). E de acordo com Soares et al. (2022) 5% da bacia do rio Sarapuí no ano de 2019 é de uso antrópico.

Figura 11. Distribuição da perda de vegetação para uso antrópico dos últimos trinta anos na bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.



Fonte: O Autor (2022).

Desta forma, na Figura 12 são apresentados exemplos das representações visuais de perda de vegetação efetiva, ou seja, para usos antrópicos (i.e., áreas urbanas, estradas e mineração), do método DM_{NDVI} para os últimos trinta anos na bacia do rio Sarapuí.

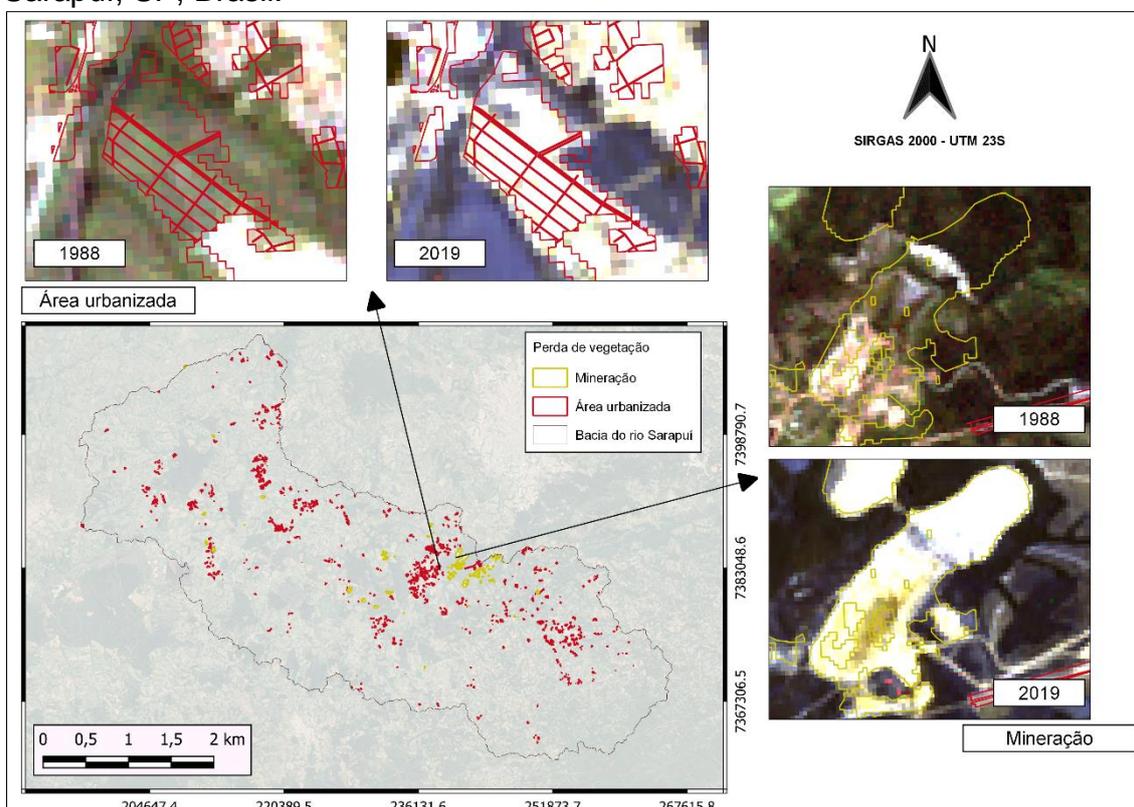
De acordo com Santos et al. (2020) o processo de perda de florestas nativas, pode ser compreendido pelo crescimento da expansão urbana, culturas agrícolas e pastagens, que são os principais usos que intensificam o desmatamento.

De acordo Carvalho et al. (2010) e Houghton et al. (2001) as ações antrópicas em transformações, seja na paisagem quanto na atmosfera, contribuem para o desequilíbrio ambiental. Desta forma, estes 18,86 km² de mudanças de vegetação efetiva, se tornando quase irreversível a recuperação destas áreas, carregando um alto impacto ambiental.

Neste contexto, priorizar áreas para conservar vegetação nativa, e realizando o pagamento pelos serviços ambientais gerados, faz com que haja essas mudanças quase que irreversíveis sejam incapacitadas de ocorrer. E

muito pelo contrário, os ganhos de vegetação podem ser maiores do que as perdas.

Figura 12. Exemplos da perda de vegetação para uso antrópico na bacia do rio Sarapuí, SP, Brasil.



Fonte: O Autor (2022).

Scarano e Ceotto (2015) alertaram que um fator preocupante na sustentação da biodiversidade, é que a maioria dos fragmentos florestais da Mata Atlântica possuem tamanho reduzido e a sobrevivência de muitas espécies é comprometida. Ou seja, perder 0,84%, (i.e., bacia do rio Sarapuí) de floresta nativa, pode dificultar a conectividade florestal para a polinização de mariposas (D'ARROCHELLA et al., 2020), mobilidade de espécies ameaçadas (RODRIGUES, 2019), geração de corredores ecológicos (GADELHA, 2019 e RIBEIRO et al., 2019).

Tendo diversos estudos relacionados a perda da biodiversidade, que vem se causando principalmente pela fragmentação de vegetação. Que de acordo com Fagan et al. (2016), afirmam que áreas com 1% de ganho de cobertura florestal pode melhorar a conectividade em 2%. Portanto, a bacia do rio Sarapuí teve 15,97% de perda de vegetação (i.e., nos diferentes uso e cobertura do solo)

e 6,14% de ganho, auxiliando com a conectividade de acordo com o autor supracitado.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que as técnicas atuais de sensoriamento remoto para o monitoramento de uso e cobertura do solo apresentam bastante complexidades, dificultando uma automatização para a realização da detecção de mudança direta. Entretanto, a realização de procedimentos diretos como DM_{NDVI} e DM_{DID} auxilia o analista, de maneira simples a identificar áreas de conversão de forma automática.

Que mesmo diante das condições e particularidades da área de estudo, ou seja, um ambiente tipicamente rural, vale ressaltar que para a classificação supervisionada orientada ao objeto, houve diferenças nos valores de segmentação (i.e., Edge e mesclagem) para os métodos aplicados. Ainda na classificação, os valores de limiares para os métodos diferenciaram-se, além dos diferentes anos.

Neste contexto, pode-se dizer que os métodos se diferenciaram estatisticamente entre si, sendo o melhor método definido pela quantidade de erros (i.e., fp e fn) e acertos. No caso deste estudo foi o método DM_{NDVI} , que apresentou melhores resultados.

Quando comparados os métodos com e sem correção radiométrica e atmosféricas, não houve diferenças significativas, para nossa área de estudo. Conclui-se, assim que se pode utilizar os métodos DM_{DID} ou AVM, sem as correções prévias de suas respectivas imagens de SR, o que acelera o processo de detecção.

Com base nos resultados obteve-se, ainda, que os métodos de DM auxiliam a quantificar as perdas de vegetação de áreas específicas. Por meio de DM_{NDVI} , inferiu-se que nos últimos trinta anos, 22,12% da área total da bacia apresentou algum tipo de mudança de uso e cobertura do solo, em algum momento. Em cerca de 6,14 % da bacia houve incremento de vegetação e 15,97% perda, sendo irreversível o retorno para a vegetação em 1,21%, em que se perdeu algum tipo de vegetação para coberturas de ações antrópicas.

Por fim, pode-se concluir que o DM_{NDVI} é um método semiautomático, qual precisa do auxílio de um especialista, contudo é de fácil manuseio e agilidade. E

os resultados da DM pode auxiliar na realização da tomada de decisão para pagamentos de serviços ambientais, assim como na fiscalização das mudanças de uso e cobertura do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- BEZERRA, U. A. et al. Comparison of the normalized difference vegetation index (NDVI) between the sensors oli-landsat satellite-8 and msi-sentinel-2 satellite in semi-arid region. **Anuario do Instituto de Geociencias**, v. 41, n. 3, p. 167–177, 2018.
- BLASCHKE, T. Object based image analysis for remote sensing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, p. 2-16, 2010.
- BOVOLO, F. et al. A framework for automatic and unsupervised detection of multiple changes in Multitemporal Images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 50, n. 6, p. 2196–2212, 2012.
- BRANDELERO, C. et al. Espectrorradiometria na região do visível e do infravermelho próximo em povoamento de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, v. 22, p. 215-222, 2012.
- BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente. Áreas Prioritárias para Conservação da Biodiversidade Brasileira**. Brasília: MMA, 2017. Disponível em: <http://areasprioritarias.mma.gov.br/>. Acesso em: 10 Jan 2021.
- BROTTO, M. L. et al. Riqueza e endemismo de Lauraceae no Paraná: aspectos fitogeográficos e áreas prioritárias para a conservao. **Rodriguésia**, v. 70, 2019.
- BURGER, Wilhelm; BURGE, Mark J. Digital image processing: an algorithmic introduction using Java. **Springer**, London, p. 37-56, 2016.
- CANEDO, L. F. T. **Pagamento por serviços ambientais: análise do programa "Produtor de água no Ribeirão João Leite"**. Dissertao (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Goiás, 2021.
- CARLSON, T. e RIPLEY, D. A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. **Remote sensing of Environment**, v. 62, n. 3, p. 241-252, 1997
- CARVALHO, J. L. N. et al. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Rev. Bras. Ciência Solo**, v. 34, n. 2, p. 277-290, 2010.
- CLEMENTE, C. M. S. et al. Estimates of deforestation avoided by protected areas: a case study in Brazilian tropical dry forests and Cerrado. **Landscape Research**, Oxfordshire, v. 45, n. 4, p. 470-483, 2020.

- COELHO, A. S. et al. Impactos das mudanças de uso da terra nas áreas prioritárias para conservação da biodiversidade no nordeste do estado do Pará, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi-Ciências Naturais**, v. 13, n. 1, p. 107-120, 2018.
- COELHO, N. R. et al. Como se paga pelo serviço ambiental hídrico? Uma revisão das experiências brasileiras. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 56, 2021.
- COHEN, J. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 37–46, 1960.
- CONGALTON, R. G. e GREEN, K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices. **Lewis Publ ed. New York: Lewis Publishers**, 1999.
- COPPIN, P. R. e BAUER, M. E. Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. **Remote Sensing Reviews**, p. 207–234, 1996.
- COSTA, D. P. et al. Morfometria e dinâmica de desmatamento da microbacia Canaã, Amazônia, Brasil. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 5, n. 12, p. 30754-30772, 2019.
- D'ARROCHELLA, M. L. G. Fragmentação florestal da Mata Atlântica: conectividade potencial via polinização por mariposas e modelagem atmosférica. **Projeto Gráfico**, 2020.
- EPIPHANIO, J. C. N. et al. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 6, p. 445–454, 1996.
- FAGAN, M. E. et al. O reflorestamento direcionado pode reverter os declínios na conectividade de aves do sub-bosque em um corredor de habitat tropical. **Aplicações Ecológicas**, v. 26, n. 5, pág. 1456-1474, 2016.
- FORERO-MEDINA, G. e VIEIRA, M. V. Conectividade funcional e a importância da interação organismo-paisagem. **Oecologia Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 4, p. 493-502, 2007.
- FELDE, G. W. et al. Analysis of Hyperion data with the FLAASH atmospheric correction algorithm. **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**. Proceedings, v. 1, p. 90–92, 2003.

- FERREIRA, I. J. M. et al. Landscape pattern changes over 25 years across a hotspot zone in southern Brazil, **Southern Forests: A Journal of Forest Science**, v. 81, n. 2, p. 175-184, 2019.
- FRANCO, M. A. R. Planejamento ambiental para a cidade sustentável. São Paulo: **Annablume**: Fapesp, 2001.
- FOODY, G. M. e MATHUR, A. A relative evaluation of multiclass image classification by support vector machines. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 6, p. 1335–1343, 2004.
- FURTADO, L. F. A. et al. Análise de imagem baseada em objeto para classificação das fisionomias da vegetação em imagens de alta resolução espacial. **Geociências**, São Paulo, v. 32, n.3, p.441-451, 2013.
- GADELHA, J. P. N. et al. Fragmentação e o planejamento municipal da mata atlântica para elaboração do corredor ecológico no Estado de Santa Catarina Município de Itapoá. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 7, n. 52, 2019.
- GANEM, K. A. et al. Impacto da Correção Atmosférica na Classificação da Cobertura da Terra da Carta Topográfica SC-24-VC (Petrolina) Utilizando o Google Earth Engine e Imagens Landsat-8. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 2, p. 100-116.
- GAROFALO, D. F. T. et al. Análise comparativa de classificadores digitais em imagens do Landsat-8 aplicados ao mapeamento temático. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 7, p. 593–604, 2015.
- GLASBEY, C. A. e HORGAN, G. W. Análise de imagens para as ciências biológicas. **Chichester: Wiley**, 1995.
- GRÊT-REGAMEY, A. et al. Integrating ecosystem services into spatial planning—A spatial decision support tool. **Landscape and Urban Planning**, v. 165, p. 206–219, 2017.
- HOUGHTON, J. T. et al. Climate Change 2001: The Scientific Basis. **Cambridge University Press: Cambridge**, p. 95, 2001.
- HOVI, A. et al. A spectral analysis of 25 boreal tree species. **Silva Fenn**, v. 51, n. 4, p. 1-16, 2017.
- HOWARTH, P. J. e WICKWARE, G. M. Procedimentos para detecção de alterações usando dados digitais Landsat. **Revista Internacional de Sensoriamento Remoto**, v. 2, n. 3, pág. 277-291, 1981.

- HUANG, C. et al. An assessment of support vector machines for land cover classification. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 4, p. 725–749, 2002.
- IBRAHIM, M. Change Detection of Vegetation Cover Using Remote Sensing Data as a Case Study: Ajloun Area Change Detection of Vegetation Cover Using Remote Sensing Data as a Case Study: Ajloun Area. **Civil and Environmental Research**, Vol.8, No.5, p. 1–6, 2016.
- ISLAM, K. et al. Land use classification and change detection by using multi-temporal remotely sensed imagery: The case of Chunati wildlife sanctuary, Bangladesh. **Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 21, n. 1, p. 37–47, 2018.
- JENSEN, J. R. e JOHN R, J. Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres (Tradução da Segunda Edição). **Parêntese ed. São José dos Campos: Parêntese**, 2009.
- JENSEN, J. R. Introductory Digital Image Analysis: A Remote Sensing Perspective. **Prentice Hall**. 2015
- JUNIOR, C. H. L. S. et al. Dinâmica das queimadas no Cerrado do Estado do Maranhão, Nordeste do Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 35, p. 1-14, 2018.
- KHELIFI, L. e MIGNOTTE, M. Deep Learning for Change Detection in Remote Sensing Images: Comprehensive Review and Meta-Analysis. **IEEE Access**, v. 8, p. 126385–126400, 2020.
- LEE, J. S. et al. Quantitative comparison of classification capability: Fully polarimetric versus dual and single-polarization SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n. 11, p. 2343–2351, 2001.
- LEMES, P. et al. Climate change threatens protected areas of the Atlantic Forest. **Biodiversity and Conservation**, v. 23, n. 2, p. 357-368, 2014.
- LILLESAND, T. M. et al. Remote sensing and image interpretation. New York: **John Wiley and Sons**, 2004.
- LIM, H. S. et al. High Spatial Resolution Land Cover Mapping Using ALOS Data Over Kedah, Malaysia. In: **First Joint PI Symposium of ALOS DataNodes for ALOS Science Program Kyoto**. Anais. p. 1-4-, 2007.
- LIMA, F. N. et al. A. Análise do método de detecção de mudanças na superfície da sub-bacia do rio Taperoá – Paraíba. **Revista Ambiência** Guarapuava (PR), v.13 n.1 p. 183 - 200, 2017.

- LINDENMAYER, D. B. et al. A checklist for ecological management of landscapes for conservation. **Ecology Letters**, Oxford, v. 11, n. 1, p. 78-91, 2008.
- LISBOA, L. S. et al. Análise temporal da fragmentação florestal no leste da Amazônia legal. **Novos Cadernos NAEA**, v. 22, n. 3, 2019.
- LORENA, R. B. et al. Uma técnica de análise de vetores de mudança para monitorar o uso/cobertura da terra no Sudoeste da Amazônia: estado do Acre. **PECORA 15-Integração do Sensoriamento Remoto em Escala Global**, Regional e Local, p. 8-15, 2002.
- LU, D. et al. Change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 12, p. 2365–2401, 2004.
- LU, Y. et al. Detection and prediction of land use/land cover change using spatiotemporal data fusion and the Cellular Automata–Markov model. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 2, 2019.
- MALILA, W. A. Change Vector Analysis: an Approach for Detecting Forest Changes With Landsat. **Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers**, p. 326–336, 1980.
- MATOS, T. P. V. et al. Áreas protegidas e fragmentação florestal: índice de sustentabilidade para priorização de fragmentos para restauração da paisagem. **Geologia, Ecologia e Paisagens**, v. 5, n. 1, p. 19-31, 2021.
- MAPBIOMAS. **Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil**. Coleção 5. Goiânia, Brasil. 2020. Disponível em: <https://mapbiomas.org/o-projeto>. Acesso em: 10 dez. 2021.
- MARGULES, C. R. e PRESSEY, R. L. Systematic conservation planning. **Nature**, v. 405, n. 6783, p. 243-253, 2000.
- MAURANO, L. E. P. et al. Padrões espaciais de desmatamento e a estimativa da exatidão dos mapas do PRODES para Amazônia Legal Brasileira. **Ciência florestal**, v. 29, p. 1763-1775, 2019.
- MENESES, P. R. e ALMEIDA, T. de. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- MESHARAM, S. G. e SHARMA, S. K. Prioritization of watershed through morphometric parameters: a pca-based approach. **Applied Water Science**, v.7, n.3, p.1505-1519, 2017.

- MORAIS, G. F. D. et al. A relação entre as mudanças na paisagem e a vazão da bacia do rio Capim, Pará, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi-Ciências Naturais**, v. 14, n. 2, p. 255-270, 2019.
- MOTA, S. Gestão ambiental de recursos hídricos. 3.ed. atual. rev. **Rio de Janeiro: ABES**, p. 343, 2008.
- NASCIMENTO, R. F. F. et al. O algoritmo Support Vector Machines (SVM): avaliação da separação ótima de classes em imagens CCD-CBERS-2. In: (INPE, Ed.) **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal - BR, 2009.
- NETA, S. R. A. et al. Aplicação de um Modelo de NDVI para Detecção Multitemporal de Mudanças no Uso e Cobertura do Solo. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 3, p. 592-604, 2018.
- NÉTO, N. C. G. et al. Soluções Baseadas na Natureza aplicadas à conservação e à gestão integrada das águas: um estudo prospectivo à luz da Agenda 2030 da ONU. **Revista Principia**, v.1, n.51, p.30-42, 2020.
- NETO, D. P. A. et al. O impacto de um programa de preservação do patrimônio de interesse turístico em uma cidade do sul do Brasil. **Mouseion**, n. 38, p. 1-14, 2021.
- ODURO APPIAH, J. et al. Measuring forest change patterns from oil and gas land use dynamics in northeastern British Columbia, 1975 to 2017. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 1, 2020.
- OKYAY, U. et al. Airborne lidar change detection: An overview of Earth sciences applications. **Earth-Science Reviews**, v. 198, p. 102929, 2019.
- PAL, M. e MATHER, P. M. Support vector machines for classification in remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 5, p. 1007–1011, 2005.
- PEREIRA, J. O. et al. Critérios para a seleção de áreas prioritárias para a conservação em bacias hidrográficas. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 3, p. 333-348, 2021.
- PERUZZO, J. S. et al. Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento ambiental da bacia do Alto Piranhas, Semiárido Nordeste (Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 7, n. 3, 2019.
- PICHARILLO, C. e RANIERI, V. E. L. Pagamento por Serviços Ambientais: Orientações para a Identificação de Áreas prioritárias com foco na biodiversidade. **Ambiente & Sociedade**, v. 22, 2019.

- PIRNAZAR, M. et al. Change Detection of Urban Land Use and Urban Expansion Using GIS and RS, Case Study: Zanzan Province, Iran. **International Journal of Constructive Research in Civil Engineering**, v. 4, n. 1, p. 23–38, 2018.
- PONZONI, F. J. e SHIMABUKURO, Y. E. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação. 1. ed. São José dos Campos: **Ed. Parêntese**. v.1, p. 135, 2007.
- PORANGABA, G. F. O. e AMORIM, M. C. D. C. T. Geotecnologias Aplicadas à Análise de Ilhas de Calor de Superfície em Cidades do Interior do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geografia Física, Recife**, v. 12, n. 06, p. 2041-2050, 2019.
- RAMOS, M. P. e NÓBREGA, R. A. A. Geotecnologias em perícias ambientais: aplicabilidade para estudos em represas de abastecimento e áreas protegidas. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v. 11, n. 3, p. 469-484, 2020.
- RAMOS, R. S. P. S. e RAMOS, P. V. P. Análise espacial como ferramenta de identificação de áreas prioritárias de intervenção para prevenção da sífilis. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 26, p. 3733-3742, 2021.
- RAUTIAINEN, M. et al. Spectral properties of coniferous forests: A review of in situ and laboratory measurements. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 207, 2018.
- RIBEIRO, E. P. et al. Estimativa dos índices de vegetação na detecção de mudanças ambientais na bacia hidrográfica do rio Pajeú. **Geosul**, v. 31, n. 62, p. 59–92, 2016.
- RIBEIRO, M. P. et al. Avaliação da estrutura da paisagem visando à conservação da biodiversidade em paisagem urbanizada. **Ciência Florestal**, v. 30, p. 819-834, 2020.
- RODRIGUES, F. P. Mobilidade da Espécie *Callithrix aurita* por meio da Conectividade Funcional dos Remanescentes Florestais. **Revista Científica UMC**, v. 4, n. 3, 2019.
- RODRIGUES, T. et al. Detection of land cover change in the Brazilian Cerrado using radar data (Sentinel-1A). **Sociedade & Natureza**, v. 31, p. 1–20, 2019.
- Rouse Jr, J. W., et al. "Paper a 20." **Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium: Section AB. Technical presentations. Vol. 1.**

Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration, 1973.

- ROSOT, M. et al. **Índices espaciais para a detecção de áreas prioritárias para restauração em zonas ripárias**. Embrapa Florestas-Documents (INFOTECA-E), 2021.
- SAFAR, N. V. H. et al. Resilience of lowland Atlantic forests in a highly fragmented landscape: insights on the temporal scale of landscape restoration. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 470, 2020.
- SANTOS, L. D. et al. Dinâmica do Desmatamento da Mata Atlântica: Causas e Consequências. **R. gest. sust. ambient.**, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 378-402, 2020.
- SCARANO, F. R. e CEOTTO, P. Brazilian Atlantic forest: impact, vulnerability, and adaptation to climate change. **Biodiversity and Conservation**, London, v. 24, p. 2319-2331, 2015.
- SHIMABUKURO, Y. E. et al. Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do pantanal. **Área de Informação da Sede-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 1998.
- SILVA, A. L. et al. Herramientas para priorizar los Servicios Ecosistémicos prestados por fragmentos forestales en el contexto de las ciudades. **Ambiente & Sociedade**, v. 24, 2021.
- SILVA, D. F. **Percepção Ambiental da APA Estrada Parque Piraputanga**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Aquidauana, MS, p. 90, 2018.
- SILVA, L. S. Uso do geoprocessamento para mapeamento do uso e ocupação do solo com ênfase em métricas da paisagem: um estudo de caso na bacia hidrográfica do rio Água Branca. **Revista Acta Ambiental Catarinense**, v. 17, n. 1, p. 33-44, 2020.
- SILVEIRA, V. M. M. e BRENTANO, T. B. SIG Participativo para o Apoio À Gestão e Tomada de Decisão em Unidades de Conservação: Estação Ecológica Do Taim-Fase. **Salão de Extensão, Caderno de resumos**. Porto Alegre, 2016.
- SINGH, A. Review Article: Digital change detection techniques using remotely-sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 989–1003, 1989.

- SOARES, D. D. O. et al. Análise das classificações supervisionada e não supervisionada com o uso de imagens Landsat 5 TM e RapidEye, e suas contribuições para o mapeamento do uso e cobertura do solo no Parque Nacional das Emas. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 4, n. 2, p. 110, 2016.
- SOARES, D. R. et al. Conectividade estrutural da vegetação nativa para o planejamento da conservação florestal. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 4, 2022.
- SOUSA, I. C. N. e MENZORI, I. V. D. Urbanização Sustentável: Métricas Espaciais e Tipologias De Crescimento. **Revista Caminhos De Geografia, Uberlândia**, v. 22, n. 84, p. 36-55, 2021
- SONG, C. et al. Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? **Remote Sensing of Environment**, v. 75, n. 2, p. 230–244, 2001.
- SOS MATA ATLÂNTICA. Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica Período 2018-2019. São Paulo: **Fundação SOS Mata Atlântica**, 2021. Disponível em: https://www.sosma.org.br/wp-content/uploads/2020/06/2020_Atlas_Mata_Atlantica_2018-2019_relatorio_tecnico_final-1.pdf Acesso em:10 ago. 2021.
- STEINWART, I. e CHRISTMANN, A. Support Vector Machines. New York: **Springer-Verlag**, 2008.
- TABARELLI, M. e GASCON, C. Lições da pesquisa sobre fragmentação: aperfeiçoando políticas e diretrizes de manejo para a conservação da biodiversidade. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 181-188, 2005.
- TEWKESBURY, A. P. et al. A critical synthesis of remotely sensed optical image change detection techniques. **Remote Sensing of Environment**, v. 160, p. 1–14, 2015.
- TUNNER, B. L. et al. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. **PNAS**, v. 103, n. 128, p. 13070–13075, 2007.
- U.S. Geological Survey. **Landsat 8 (L8): Data users handbook**. Sioux Falls: USGS, 2015. 97p.
- VAPNIK, V. N. **The nature of statistical learning theory**. Springer- ed. New York. v. 8 Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18255760>>

- VALENTE, R. A. et al. Multicriteria decision analysis for prioritizing areas for forest restoration. **Rev. Cerne**, v.23, n.1, p.53-60, 2017.
- VALENTE, R. A. et al. A multicriteria evaluation approach to set forest restoration priorities based on water ecosystem services. **Journal of Environmental Management**, v. 285, p. 112049, 2021.
- VANDERLEY-SILVA, I. e VALENTE, R. A. Assessing Environmental Criteria to Support Forest Connectivity. PREPRINT (Version 1) available at **Research Square**, 2021
- VINHOLIS, M. de et al. Pagamento e valoração dos serviços ambientais. **Embrapa Pecuária Sudeste-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2021.
- YU, W. et al. A new approach for land cover classification and change analysis: Integrating backdating and an object-based method. **Remote Sensing of Environment**, v. 177, p. 37–47, 2016.
- ZHU, Z. Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 130, p. 370–384, 2017.
- WEISS, C. V. et al. Análise comparativa entre métodos de correção atmosférica em imagens do sensor Operational Land Imager (OLI), plataforma Landsat 8. **Scientia Plena**, v. 11, n. 2, 2015.
- WHITESIDE, T. G. et al. Comparing object-based and pixel-based classifications for mapping savannas. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. v. 13, p. 884–893, 2011.