

6 • SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL

**Markus Gastauer, Rafael Walter Albuquerque, Carlos
Henrique Grohmann, Luiz Eduardo Vicente, Luis Oliveira Jr**

6.1 ABORDAGEM GERAL DE SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL

Milhares de satélites artificiais orbitam o planeta Terra com os mais diversos fins. Podemos distinguir satélites militares e civis, satélites mantidos por entidades privadas e públicas, que disponibilizam seus dados para a ciência, ou aqueles utilizados para espionagem, posicionamento, comunicação e a observação da Terra (LUBOJEMSKI, 2019). Os sensores a bordo de satélites realizam medições periódicas da superfície do planeta, e passam com diferentes frequências (dias ou semanas) em diferentes pontos da superfície terrestre. Considerando suas diferentes coberturas espaciais e frequência de medições, sensores orbitais ópticos oferecem possibilidades sem precedentes para gerar informações à meteorologia e ao monitoramento da atmosfera, dos oceanos e da superfície terrestre (ALMEIDA et al., 2020).

Dependendo da necessidade do usuário e da aplicação específica, diferentes técnicas para o sensoriamento remoto da superfície terrestre via sensores orbitais estão disponíveis, podendo os sensores serem ativos ou passivos. Os sensores ativos emitem a radiação e captam o retorno das mesmas, não dependendo de luz solar ou de nuvens quando operantes na faixa das microondas. Já os sensores passivos dependem da ocorrência de luz solar e da ausência de nuvens para extrair informações da superfície porque captam a radiação solar refletida pelos objetos (JENSEN, 2009; MENESES; ALMEIDA, 2012).

Os sensores ativos¹ podem ser do tipo RADAR como, por exemplo, os satélites

¹ Também existem radares passivos, nas microondas, geralmente entre 1 cm e 1 m (JENSEN; EPIPHANIO, 2009).

do tipo Sentinel-1, que emitem ondas na faixa das microondas do espectro eletromagnético e capturam a intensidade e a fase do seu eco para inferir sobre a estrutura da superfície. Sensores RADAR operam na faixa das microondas e possuem a vantagem de independem da presença de nuvens, uma vez que suas ondas são capazes de passar pelas mesmas. Os padrões de reflexão das ondas de RADAR dependem da estrutura física das superfícies e diferem, por exemplo, entre corpos d'água, florestas e solos expostos, o que permite sua distinção nas imagens produzidas. Duas ou mais imagens pareadas de períodos distintos permitem a detecção de deformações da superfície causadas por terremotos ou rupturas de barragens (FLORES et al., 2019). Outro exemplo de sensor ativo diz respeito ao GEDI (*Global Ecosystem Dynamics Investigation*), um sensor LiDAR embarcado em plataforma orbital. Por se tratar de tecnologia LiDAR, mais informações sobre o GEDI encontram-se no capítulo 8.

Já os sensores passivos captam ondas dentro do espectro da luz visível (RGB, do inglês *Red/Green/Blue* - 0,4 - 0,75 μm), do infravermelho próximo (NIR, do Inglês *near infrared* - 0,75 - 1,4 μm) ou do infravermelho de ondas curtas (SWIR, do Inglês *short-wave infrared* - 1,4 - 2,5 μm), ou em casos de sensores mais específicos no infravermelho distante (FIR, do inglês *far infrared* - 15 - 1000 μm) (valores de comprimentos de onda por região do espectro podem variar minimamente em diferentes referências bibliográficas). Diferentes comprimentos de ondas, chamados de bandas, são capturados separadamente e geram imagens multiespectrais da superfície terrestre. Conforme descrito em Novo (2008), os satélites ópticos diferem em relação à sua:

Resolução espacial: área na superfície terrestre que corresponde a um pixel, que varia de 0,3 x 0,3 m para alguns satélites comerciais, 10 x 10 m para a missão Sentinel-2, 30 x 30 m para a série Landsat e 250 x 250 m para o sensor Modis, a bordo das plataformas orbitais Terra e Aqua;

Resolução radiométrica: representa em bits o total possível de variação do valor do nível de cinza da imagem. Por exemplo, uma imagem de 8 bits (8 bits significam $2^8=256$ diferentes níveis de cinza) possui pixels que variam de 0 a 255, enquanto que uma imagem de 12 bits (12 bits significam $2^{12}=4096$ diferentes valores) possui pixels que variam de 0 a 4095;

Resolução espectral: número e largura das bandas e a identidade da faixa do espectro eletromagnético capturada, variando de imagens RGB (ex. WorldView, GeoEye) até sensores multiespectrais com mais do que 10 bandas, cobrindo, além do RGB, o SWIR, NIR para distinguir diferentes aspectos da vegetação (ex. Sentinel-2, Landsat); e

Resolução temporal: que corresponde ao intervalo entre duas medições do mesmo local, variando entre poucos dias até semanas.

CARACTERÍSTICA	LANDSAT	SENTINEL	SPOT-4/5	CBERS-4/4A	PLANET
RESOLUÇÃO ESPACIAL	30 M (MULTI) 15 M (PAN)	10 M	1 KM	20/8 M (MULTI) 20/2 M (PAN)	3 M
BANDAS	G, B, R, NIR, SWIR	G, B, R, NIR, SWIR	G, R, NIR, SWIR	G, B, R, NIR	G, B, R, NIR
RESOLUÇÃO TEMPORAL	16 DIAS	5 DIAS	1 DIA	26/31 DIAS	1 DIA
RESOLUÇÃO RADIOMÉTRICA	12 BITS	12 BITS	8 BITS	8/10 BITS	12 BITS
TAMANHO DE CENA BÁSICA	170 X 183 KM	100 X 100 KM	60 X 60 KM		20 KM X 12 KM
LARGURA DA FAIXA IMAGEADA	185 KM	290 KM	2.250 KM	120/92 KM	20 KM
ANO DE INÍCIO DA DISPONIBILIZAÇÃO DOS DADOS	1985	2016	1998	2014/2019	2015
GRATUIDADE	SIM	SIM	PARCIALMENTE	SIM	PARCIALMENTE
ONDE ENCONTRAR	USGS; GEE	USGS; GEE	USGS	INPE	PLANET/NICFI

Tabela 9

Exemplos de características e resoluções de alguns satélites ópticos, onde R = *Red* (vermelho), G = *Green* (verde), B = *Blue* (azul), NIR = *Near Infrared* (infravermelho próximo), SWIR = *Short Wave Infrared* (infravermelho médio), USGS = *United States Geological Survey*, GEE = *Google Earth Engine* e INPE = Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

A **Tabela 9** traz exemplos de sensores orbitais e suas respectivas resoluções. Os satélites apresentados são os mais utilizados, com acesso facilitado para o público em geral (i.e., vários portais para pesquisa e download), ampla disponibilidade de dados (inclusive de acervo), além de gratuitos em boa parte dos casos.

Baseado nas características dos sensores e nas rotinas de classificação de imagens, diferentes classes de vegetação e de uso da terra podem ser reconhecidas (SCHÖWENGERDT, 2007). Para isso, uma série de ferramentas de classificação automatizada ou semi-automatizada estão disponíveis nos mais diversos sistemas de informação geográfica (SIG). Índices espectrais como o índice de vegetação normalizada (NDVI, do Inglês *Normalized difference vegetation index*) são utilizados historicamente para detectar o vigor da vegetação (HUETE; JACKSON, 1987) e estimar, por exemplo, estoques de carbono nas florestas temperadas (GONZÁLEZ-ALONSO et al., 2006; BANIYA et al., 2018). Já as imagens de RADAR podem ser utilizadas para estimar a altura das árvores de uma área em processo de Restauração de Ecossistemas (KHATI; SINGH; FERRO-FAMIL, 2017; BISPO et al., 2019). Ressalta-se que imagens de satélites requerem um traba-

lho de correção atmosférica (LATORRE et al., 2002), sendo que atualmente há fornecedores que já disponibilizam as imagens com esta devida correção.

Apesar dos resultados promissores envolvendo RADAR orbital e diversidade espectral para o monitoramento da restauração florestal, este Protocolo ainda não traz metodologias destas tecnologias voltadas ao monitoramento da Restauração de Ecossistemas, havendo previsão para sua inclusão nas futuras edições do documento conforme mostra o roadmap de tecnologias (seção 10). Dessa forma, o sensoriamento remoto orbital da restauração florestal neste protocolo é limitado ao mapeamento da cobertura florestal e da sua idade, pois essas são informações já tratadas por uma equipe de especialistas e disponibilizadas de forma gratuita à população por meio da plataforma MapBiomas. Afinal, são muitas as variáveis a serem consideradas ao se utilizar índices de vegetação, demandando análise de especialistas para aplicação em larga escala (ZENG et al., 2022).

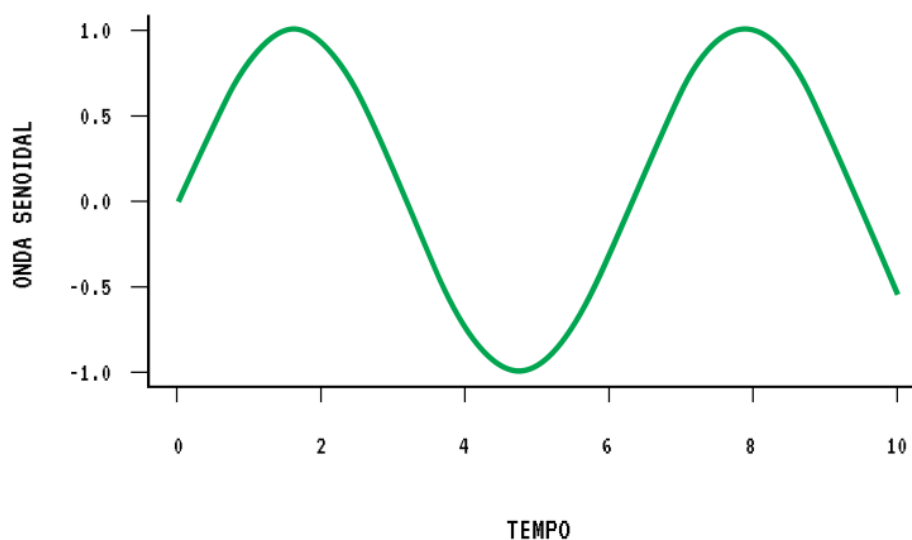
6.2 PRODUTOS MAPBIOMAS E A RESTAURAÇÃO DE ECOSISTEMAS

O mapeamento automático da cobertura do solo realizado pela plataforma MapBiomas parte da inovação apresentada por Hansen et al. (2013), que implantou o método de séries temporais no Google Earth Engine (GEE) e possibilitou a classificação da cobertura do solo no mundo todo. O método de séries temporais foi inicialmente notado por Tucker, Townshend e Goff (1985), tornando-se objeto de estudo por outros autores (NEMANI et al., 2003; HUETE et al., 2006).

Séries temporais em Sensoriamento Remoto consideram que as classes devem ser avaliadas de acordo com sua pertinência no tempo ao invés do tradicional método de avaliação isolada de cada imagem. Tal implementação partiu da percepção de que as respostas espectrais dos alvos variam em função da sazonalidade dos ecossistemas. Por exemplo, o verde das florestas tem uma tonalidade na estação chuvosa e outra tonalidade na estação seca, assim como o azul de cursos d'água e de lagoas naturais tem tonalidades diferentes nestas estações. Uma vez constatadas as diferenças espectrais conforme estação do ano, Hansen et al. (2013) trabalharam algoritmos que avaliam a variação das respostas espectrais dos alvos em várias imagens ao longo dos anos. As séries temporais, resumidamente, avaliam o valor dos pixels ao longo do tempo de forma que os mesmos apresentem valores cíclicos, a exemplo de uma senoidal (**Figura 14**).

Aplicando-se este raciocínio de respostas cíclicas ao Sensoriamento Remoto, o valor do NDVI das florestas costuma ser maior na estação chuvosa do que na estação

Figura 14
Gráfico de uma
senoidal: F
(tempo) = seno
(tempo). Os
valores do gráfico
variam de forma
cíclica entre -1 e 1.



seca, comportando-se este índice como uma espécie de senoidal ao longo do tempo. A **Figura 15**, originalmente presente em Bayma e Sano (2015) apresenta um exemplo prático da variação cíclica do NDVI de vegetação de Cerrado² ao longo do tempo, sendo possível notar a alteração do comportamento cíclico após um evento de desmatamento. Vale notar que em áreas vegetadas o NDVI pode ser sujeito à saturação, fenômeno pelo qual o índice não apresenta oscilações após novas variações da estrutura da vegetação, sendo que nestes casos outros índices podem ser mais adequados (JIANG et al., 2008; LIU; PATTEY; JÉGO, 2012).

Apesar da **Figura 15** exemplificar uma série temporal de vegetação de Cerrado, o MapBiomas gerou séries temporais de todo território brasileiro para diversas classes de cobertura do solo a partir de imagens do satélite Landsat de 1985 aos dias atuais disponibilizadas gratuitamente (SOUZA et al., 2020). A acurácia obtida pelo MapBiomas é maior que 80%, mostrando-se uma base importante de conhecimento do território brasileiro de 1985 aos dias atuais. No caso deste Protocolo, o alvo de interesse consiste no dado “Vegetação secundária” do MapBiomas, onde, a partir de um processo de pós-classificação dos mapas de uso e cobertura do solo, um pixel classificado como uso antrópico por pelo menos cinco anos passa a ter respostas características de vegetação. Porém, para que seja identificada a vegetação secundária nos critérios do MapBiomas,

2 Vale ressaltar que o comportamento da vegetação do Cerrado é diferente do de uma floresta sempre verde, o que reflete nas características das séries temporais.

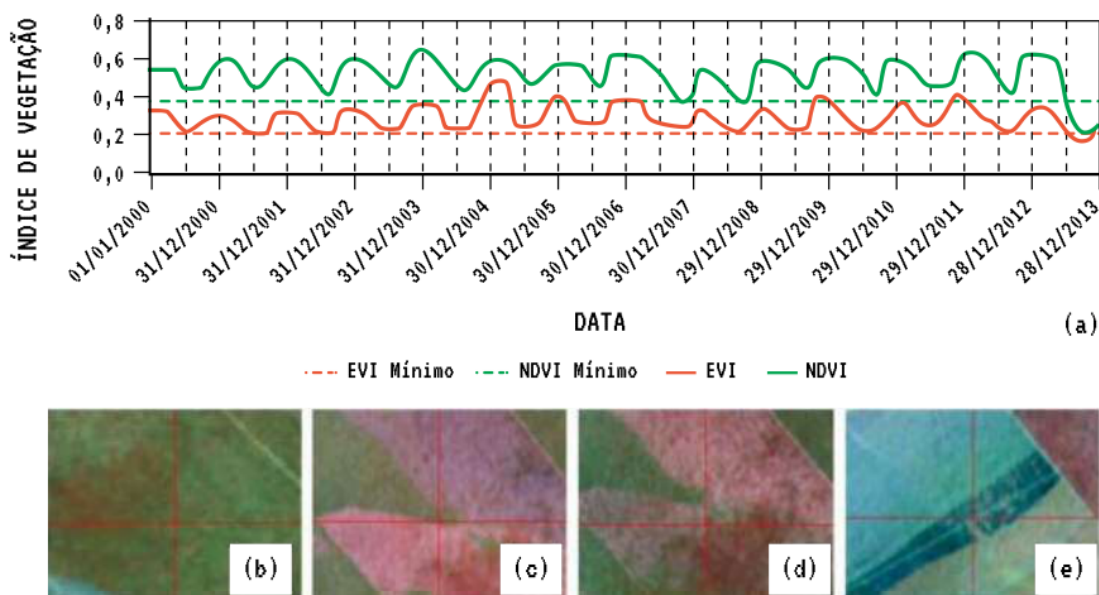


Figura 15

Séries temporais de EVI e de NDVI de um ponto em Mateiros (latitude: 10° 27' 21,11 "S; longitude: 46° 02' 47,75 "W) com correspondentes limiares de desmatamento de uma formação savânica (a). Em meados de 2013, as séries temporais cruzaram os limiares de desmatamento (seta preta). O desmatamento nesse período pode ser confirmado pelos recortes de cena do satélite Landsat de 14 de agosto de 2010 (não desmatado) (b), recorte de cenas do Resourcesat LISS 3 de 2 de setembro de 2011 (não desmatado) (c) e 10 de julho de 2012 (não desmatado) (d) e recorte de cena do satélite Landsat de 29 de julho de 2013 (desmatado) (e). Fonte: Bayma e Sano (2015).

o retorno às características típicas de vegetação não deve ocorrer de forma isolada em um único pixel, mas sim em pelo menos cinco pixels adjacentes entre si que apresentem características de vegetação durante ao menos três anos seguidos (CROUZEILLES et al., 2019).

Vale ressaltar que, apesar das classes de uso e cobertura do solo do Mapbiomas apresentarem acurácia superior a 80%, a vegetação secundária obtida no processo de pós- classificação, assim como as classes, é sujeita a inconsistências ao se avaliar a escala local porque cada pixel possui 30 x 30 metros, área de 900 metros quadrados (GUERREIRO et al., 2020; NEVES et al., 2020), uma extensão que pode englobar mais de um tipo de cobertura do solo. Também é possível englobar em um mesmo pixel eventuais ruídos oriundos do processo de captação de imagem pelo satélite (JENSEN, 2009; MENESSES; ALMEIDA, 2012). Logo, o usuário deste Protocolo deve se atentar ao fato de que as informações obtidas pelo satélite Landsat devem ser consideradas como uma informação preliminar sobre a área no caso de ausência de informações de campo ou de outras fontes de imagens de melhor resolução espacial. Para amenizar inconsistências,

recomenda-se verificar a idade da vegetação secundária identificada pelo MapBiomas, pois idades de quatro anos ou mais possuem menor incerteza em relação ao processo de mapeamento automático, além de apresentarem menor chance de serem novamente convertidas em áreas antropizadas.

Apesar das limitações da base MapBiomas para avaliações em escala local, é importante salientar que as informações desta base de dados são disponibilizadas de forma gratuita e o usuário não precisa ser especializado em Sensoriamento Remoto para obtê-las, caracterizando um importante conjunto de informações que podem auxiliar o processo de tomada de decisão antes de ir a campo ou antes de adquirir outras imagens (GUERRERO et al., 2020). Afinal, o monitoramento da vegetação deve integrar escalas nacionais e locais, o que é possível mediante integração de dados orbitais com outras geotecnologias, sistemas informatizados e informações de campo (PORTILLO-QUINTERO et al., 2021).

Logo, o mapeamento da vegetação secundária pela plataforma MapBiomas permite estimativas gratuitas sobre o cumprimento de comprometerimentos e obrigações legais, além de possíveis inferências indiretas que requerem mais atividades de P&D para estimar, a partir de relações e regressões com a idade, o estágio sucessional, o estoque de carbono e a biodiversidade. A seção 6.3 apresenta uma breve descrição do *Google Earth Engine* (GEE), ferramenta que pode ser empregada para detectar a cobertura de copas (dossel) e a idade da vegetação secundária identificada a partir do mapeamento MapBiomas.

Sobre as perspectivas de uso de imagens do satélite Sentinel³, a plataforma MapBiomas disponibilizou, até o momento de elaboração deste texto, a versão beta do mapeamento do território brasileiro a partir das séries temporais deste sensor. Por ora, enquanto a primeira versão oficial desse mapeamento não estiver disponível, a seção 6.3 apresenta algumas alternativas.

6.3 O GOOGLE EARTH ENGINE PARA ACESSO A DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL

O *Google Earth Engine* (GEE) é uma plataforma de computação em nuvem para aquisição e processamento de imagens de satélite e outros dados geoespaciais e de observação. Ele fornece acesso gratuito (mediante criação de conta: <<https://earthengine.google.com/>>) a um grande banco de dados de imagens de satélite e o poder compu-

3 Vale mencionar a iniciativa *Dynamic World* do Google e World Resources Institute (WRI): <<https://www.dynamicworld.app/>>

tacional necessário para analisar essas imagens. Assim, o GEE permite a observação de mudanças dinâmicas no uso e cobertura da superfície da terra para os mais diversos fins ao conectar capacidade de armazenamento e processamento de dados através de interfaces de programação de aplicativos Python e, mais comumente, JavaScript no mapeamento automático de agricultura, florestas, recursos naturais e clima (GORELICK et al., 2017).

O arquivo de dados públicos do GEE inclui mais de quarenta anos de imagens históricas e conjuntos de dados científicos, atualizados e ampliados diariamente, o que permite a detecção de mudanças como desmatamento ou inundações em tempo quase real (DEVRIES et al., 2020). Além de imagens de satélites (coleções completas das missões Landsat, Sentinel, MODIS e outras), que diferem em termos de resolução espacial, sensores utilizados e frequência de re-amostragem, a coleção do GEE abrange uma grande quantidade de conjunto de dados relacionados a clima, tempo e propriedades geofísicas da superfície (GORELICK et al., 2017). Além de tamanha disponibilidade de dados, outro benefício do GEE é permitir que os cientistas e usuários colaborem mutuamente entre si compartilhando resultados, códigos, algoritmos e visualizações de forma gratuita (MUTANGA; KUMAR, 2019).

O GEE foi usado várias vezes como uma ferramenta para mapear e monitorar o desmatamento. As aplicações iniciais incluíram mapear as florestas do México, identificar a água na bacia do Congo e detectar o desmatamento na floresta amazônica (GEE, 2021). Usando o GEE para mapear e monitorar a perda ou ganho florestal global, a Universidade de Maryland reportou uma perda geral na cobertura florestal global (HANSEN et al., 2013). O sistema CLASlite do *Carnegie Institute for Science*⁴ e o Sistema de Alerta de Desmatamento (SAD) do Imazon⁵ são duas instituições que usam o GEE para construir mapas de florestas que medem os distúrbios ambientais e eventos de desmatamento. Outros exemplos de uso do GEE incluem o monitoramento do habitat de tigres, mapeamento de risco de malária, detecção de aumentos na vegetação ao redor do Monte Everest, e o Índice de Integridade da Paisagem Florestal anual⁶. O projeto Global Surface Water mapeia ocorrências, mudanças e sazonalidade dos corpos d'água superficiais mundiais para fornecer informação para a agricultura, a indústria e o consumo, além de geração de alertas.

4 <<https://claslite.org/>>

5 <<https://imazon.org.br/imprensa/sistema-de-alerta-de-desmatamento-sad-operacional-na-plataforma-google-earth-engine/>>

6 <https://earthengine.google.com/case_studies/>

Um exemplo de uso do GEE no Brasil é o próprio MapBiomass⁷, uma iniciativa que envolve uma rede colaborativa de especialistas que buscam entender a dinâmica do uso da terra em todos os biomas brasileiros (SOUZA et al., 2020). A seção 6.4 mostra um exemplo prático em formato passo a passo de como estimar a cobertura de copas em um polígono de interesse a partir da base do MapBiomass através do GEE. Já a seção 6.5.1 traz um exemplo prático em formato passo a passo de como estimar a média e desvio padrão da idade da vegetação secundária da base MapBiomass num polígono de interesse também através do GEE. Apesar das seções 6.4 e 6.5.1 utilizarem a plataforma GEE, ambas não demandam uso de programação nem realizam processamento de imagens, o que permite seu uso por profissionais não especializados em Sensoriamento Remoto. Basta apenas que os usuários possuam um arquivo vetorial referente ao polígono da restauração.

Alternativamente, caso o usuário não deseje obter nenhum indicador específico, mas sim verificar a ocorrência e idade estimada da vegetação secundária em determinada coordenada geográfica utilizando diretamente a plataforma MapBiomass (ao invés de usar a plataforma *Google Earth Engine*), veja um tutorial acessando este link: <https://www.pactomataatlantica.org.br/wp-content/uploads/2023/07/Tutorial_plataforma_MapBiomass_Protocolo_SR_V2.pdf>.

6.3.1 EXEMPLO: VERIFICAÇÃO DA TENDÊNCIA DO NDVI

É possível avaliar a tendência dos valores de NDVI ao longo do tempo das imagens do Sentinel num polígono de interesse via GEE. A tendência do NDVI indica se os valores deste índice (já considerando a sazonalidade das estações do ano) têm aumentado, diminuído ou se mantido estáveis de 2016 (ano de início das operações do satélite) aos dias atuais. Apesar da tendência do NDVI ao longo do tempo não avaliar um indicador de restauração específico, suas informações podem ser úteis para auxiliar uma tomada de decisão em caso de ausência de dados de campo. Como o NDVI varia de região para região, recomenda-se avaliar a tendência do NDVI não apenas no polígono de restauração, mas também em polígonos de pastagem e de floresta intacta em áreas próximas para efeitos de comparação com o que não se deseja (pastagem) e com o que se deseja (floresta). Vale lembrar também que após uma determinada evolução da restauração o NDVI tende a se estabilizar mesmo antes de se cumprir os objetivos al-

7 <<https://mapbiomas.org/>>

mejados no processo de restauração. Para avaliar a tendência do NDVI das imagens do Sentinel, basta subir o polígono de interesse do usuário no GEE (semelhante ao upload de polígono apresentado no tutorial do GEE da seção 6.4.1) utilizando este link: <<https://code.earthengine.google.com/57ee96528da6bb90790ce078b3d57ce4>>.

O código do GEE que o link acima direciona requer que o shapefile do usuário apresente uma feição apenas (um tutorial para a verificação da tendência do NDVI do satélite Sentinel pode ser verificado neste link: <https://www.pactomataatlantica.org.br/wp-content/uploads/2023/07/04-capamiolo-Tutorial_GEE_Tendencia_NDVI_Protocolo_SR.pdf>). Caso seu shapefile tenha mais de uma feição, é necessário uni-los ou dissolvê-los num *software* de Geoprocessamento antes de importá-los no GEE, assim como é necessário salvá-los em shapefiles separados caso queira verificar cada feição isoladamente. Uma outra forma de visualizar o NDVI, mas de uma imagem apenas (sem considerar as séries temporais) do satélite Sentinel e do satélite Planet, pode ser verificada num tutorial disponibilizado pelo Lapig no seguinte link: <<https://cepf.lapig.iesa.ufg.br/#/>>. Este link leva à Plataforma de Conhecimento do Cerrado, que contém um acervo de tutoriais, sendo um dos tutoriais o acesso às imagens Sentinel e Planet.

6.4 MEDIÇÃO DO INDICADOR COBERTURA DE DOSSEL VIA SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL

6.4.1 VIA PRODUTOS DO MAPBIOMAS

A cobertura de dossel é a razão entre a área coberta por vegetação e a área total do projeto. Conforme mencionado na seção 4.5, o MapBiomias mede a cobertura de dossel com ressalvas, afinal a resolução espacial dos sensores orbitais envolvidos neste processo possuem 30 metros (ou 10 metros quando forem disponibilizados os mapeamentos oficiais de vegetação secundária utilizando o satélite Sentinel). Entretanto, o acesso a este indicador obtido pelo MapBiomias é gratuito, o que torna esta uma alternativa para planejamentos e auxílios à tomada de decisão em momentos anteriores à necessidade de ir a campo. Para o cálculo da cobertura de dossel, a distribuição geográfica da vegetação secundária é fornecida pela base do MapBiomias, enquanto que a área do projeto é fornecida por um arquivo vetorial (por exemplo, shapefile) que os responsáveis pelo projeto de Restauração de Ecossistemas possuem. É portanto necessário avaliar a extensão da área da vegetação secundária dentro do polígono de interesse para na sequência dividir o valor encontrado pela área do projeto. Para checar um exemplo prático sobre como realizar

esses procedimentos, clique no seguinte link: < https://www.pactomataatlantica.org.br/wp-content/uploads/2023/07/02-capamiolo-GEE_CobFlor_GoogleDocs.pdf>.

6.4.2 VIA SENSORES ÓPTICOS DE MELHOR RESOLUÇÃO ESPACIAL

Caso haja disponibilidade de imagens de satélites ópticos de alta resolução espacial, que em geral são imagens comerciais (requerem pagamento para serem adquiridas), é possível obter a cobertura de dossel verificando-se a extensão desta classe num processo de classificação (HAQUE; AL-RAMADAN; JOHNSON, 2016; ALBUQUERQUE et al., 2018; GAW; YEE; RICHARDS, 2019; WHITESIDE; ESPARON; BARTOLO, 2020), mas tal método requer conhecimentos específicos de processamento de imagens ou de *machine learning*. Ressalta-se também que o método de séries temporais (HANSEN et al., 2013), que é o utilizado pelo MapBiomas, requer uma quantidade mínima de imagens representativas de sazonalidades climáticas (SOUZA et al., 2020; SPADONI et al., 2020), sendo necessário classificar cada imagem isoladamente na ausência deste acervo mínimo de imagens.

Também é possível lançar mão do delineamento manual de áreas com cobertura de dossel. Neste caso, conforme mencionado na seção 6.6, o profissional deve ser devidamente capacitado a realizar interpretação visual de imagens.

6.5 VERIFICAÇÃO DA IDADE DA VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA

6.5.1 VIA PRODUTOS MAPBIOMAS

Cada pixel mapeado como vegetação secundária pelo MapBiomas possui informação da estimativa da idade correspondente. O MapBiomas classifica uma área como vegetação secundária quando tal localidade, anteriormente classificada como antropizada, passa a apresentar resposta espectral característica de vegetação nativa. Esse novo comportamento espectral característico de vegetação nativa deve perdurar por tempo mínimo (em geral de ao menos três anos⁸).

A pertinência da área classificada como vegetação secundária ao longo do tempo permite registrar a estimativa da idade (trata-se de uma estimativa por ser um valor obtido mediante processo classificatório, sujeito a erros oriundos de procedimentos de

8 <<https://mapbiomas.org/metodo-desmatamento>>

automatização). Assim, a cada ano que uma vegetação secundária se mantém, aumenta-se em um ano sua idade estimada.

É necessário ressaltar que idades inferiores a quatro anos apresentam maior incerteza no seu mapeamento e maior susceptibilidade à nova conversão ao uso antrópico do solo. Assim, para verificar a média e o desvio padrão da idade da vegetação secundária, basta calcular estes valores considerando a ocorrência da vegetação secundária dentro do arquivo vetorial correspondente à área do projeto de Restauração de Ecossistemas. Para checar um exemplo prático que apresenta a média e desvio padrão da idade da classe vegetação secundária dentro de um polígono, clique no seguinte link: <https://www.pactomataatlantica.org.br/wp-content/uploads/2023/07/03-capamiolo-GEE_Idade_Regeneracao_Protocolo_SR.pdf>.

6.6 VANTAGENS E DESVANTAGENS NO USO DE SENSORES ORBITAIS

A principal vantagem no uso de satélites para o monitoramento da Restauração de Ecossistemas é a possibilidade de informações com acesso gratuito a informações valiosas para análises em escala regional, quando uma grande extensão de terras precisa ser monitorada. No escopo deste protocolo, foram preparados materiais de acesso aos produtos da plataforma MapBiomias (seções 6.4 e 6.5.1) de forma que o usuário não precisa ser especialista em Sensoriamento Remoto para fazer suas análises. Porém, conforme mencionado anteriormente neste capítulo, tais análises gratuitas, quando aplicadas em escala local a nível de projeto, podem apresentar inconsistências devido às características dos sensores utilizados, o que caracteriza, neste caso, um uso para obtenção de estimativas.

É possível utilizar satélites de melhor resolução para o monitoramento da Restauração de Ecossistemas, mas tais satélites são produtos comerciais que requerem investimento financeiro para serem adquiridos. Além do custo de aquisição, tais imagens não possuem acervo livre e em quantidade suficiente no território brasileiro para possibilitar o mapeamento da cobertura do solo de forma ampla e generalizada. Ou seja, o uso de imagens de satélites de melhor resolução (bem como de qualquer dado de Sensoriamento Remoto orbital não abordado nas seções 6.4 e 6.5.1) requer a atuação de profissional especializado para um mapeamento automático da cobertura do solo. Alternativamente, é possível a profissionais não especialistas em Sensoriamento Remoto, mediante devida capacitação em interpretação de imagens, lançar mão da fotointerpretação para coleta de informações precisas em nível de projeto (escala local) nestas imagens comerciais de alta resolução.

6.7 ROADMAP

Sensores satelitais ativos e passivos possuem amplo potencial no monitoramento da restauração florestal, mas existem, dependendo do fim do monitoramento, limitações e desafios. Enquanto os satélites ópticos dependem da luz do dia, os de RADAR podem produzir imagens também durante a noite. Além disso, ondas de RADAR atravessam as nuvens, não limitando o uso de satélites de RADAR em função da nebulosidade. Por isso, satélites de RADAR podem complementar alertas de desmatamento, especialmente em regiões tropicais, onde os satélites ópticos sofrem frequentes obstruções visuais da paisagem devido à ocorrência de nuvens, principalmente nas estações chuvosas (DOBLAS et al., 2020). Já em relação à detecção e validação de mudanças na cobertura e uso do solo, satélites de sensores ópticos são mais confiáveis (PERBET et al., 2019).

A disponibilidade de imagens gratuitas e da capacidade computacional deve gerar novas possibilidades no futuro para acompanhar sequestro de gás carbônico, biodiversidade e o cumprimento legal. Por exemplo, a interferometria de imagens de RADAR é promissora para detectar diferenças na altura de árvores em áreas de restauração florestal (KHATI; SINGH; FERRO-FAMIL, 2017; BISPO et al., 2019), mas sua detecção remota com acurácia depende de desenvolvimento de métodos para tirar o efeito da precipitação e da fenologia (deciduidade) dos modelos (KHATI; SINGH; FERRO-FAMIL, 2017). Uma ferramenta que ganha importância no sensoriamento remoto de florestas é o conceito da diversidade espectral, que calcula índices baseado na diversidade espectral dos pixels da imagem (FÉRET; ASNER, 2014; FÉRET; BOISSIEU, 2020) e podem ter relação com carbono (CLERICI et al., 2016), mas tais índices ainda demandam mais Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) para serem incluídas neste Protocolo. Outra ferramenta que vale acompanhar os trabalhos de P&D são os modelos de mistura espectral (LSM, do inglês *Linear Spectral Model*) aplicados a trabalhos de restauração (VICENTE et al., 2009).

Caso haja interesse na utilização da tecnologia de RADAR (SAR e InSAR, do inglês *Synthetic Aperture Radar* e *Interferometric Synthetic Aperture Radar*) para medição de altura das árvores, recomenda-se o trabalho de Flores et al. (2019). O material, além de abordar conceitos importantes de RADAR, como características das ondas e reflectância sobre diferentes superfícies, traz exemplos práticos sobre a medição de altura de dossel e biomassa. Apesar dos exemplos práticos em Flores et al. (2019) envolverem vegetação de biomas não-brasileiros, as futuras edições deste Protocolo abordarão a medição de altura de dossel e biomassa no contexto nacional da Restauração de Ecossistemas. Vale ressaltar, entretanto, que já ocorrem medições

de altura do dossel na Amazônia Brasileira em maior escala via SAR (LEI; TREUHAFT; GONÇALVES, 2021).

Outra metodologia promissora para estimativa da riqueza de espécies é a diversidade espectral. A hipótese da variação espectral representa uma base promissora para monitorar o retorno da biodiversidade em projetos de restauração florestal (PALMER et al., 2002; WANG; GAMON, 2019; ALMEIDA et al., 2021). As características foliares do dossel, em particular a química das folhas, variam entre as espécies e representam as diferenças funcionais entre elas (TOWNSEND; ASNER; CLEVELAND, 2008; REI-CHSTEIN et al., 2014), resultando em diferenças nos padrões de absorção e reflectância interespecíficas (CLARK; ROBERTS; CLARK, 2005; FÉRET; ASNER, 2014). Como existem evidências que a variação espectral intraespecífica é menor do que a variação interespecífica (HEINEMAN; TURNER; DALLING, 2016; HE et al., 2018), essas diferenças espectrais podem ser utilizadas para mapear determinadas espécies de interesse, tais como espécies invasoras (LEHMANN et al., 2017) ou espécies estruturantes de florestas (HE et al., 2019). Baseado na mesma lógica, maior variação espectral entre pixels vizinhos significa maior diversidade óptica, correspondendo à maior diversidade funcional da vegetação (CHITALE; BEHERA; ROY, 2019). Para que os valores da diversidade óptica possam ser transferidos em índices de biodiversidade da vegetação, a diversidade espectral detectada a partir de imagens remotas deve ser calibrada a partir de medições em campo (SCHWEIGER, 2020). Outros exemplos de identificação de espécies utilizando imagens de satélites podem ser verificados na **Tabela 1** da seção 4.

Sensores orbitais hiperespectrais também deverão apresentar resultados interessantes em larga escala no futuro, apesar dos avanços mais recentes deste tipo de sensor ocorrerem principalmente em plataformas aéreas (FILCHEV, 2014), e de já existirem há algum tempo métodos de processamento testados em sensores multiespectrais com características hiperespectrais (e.g. contiguidade de bandas) (VICENTE; SOUZA-FILHO; PEREZ-FILHO, 2005). Destaca-se nesse sentido a possibilidade de detecção direta (feições espectrais diagnósticas) de compostos bioquímicos da vegetação, como a molécula OH, associada tanto à vegetação quanto ao solo, fornecendo assim maior robustez na definição dos estágios de senescência da vegetação, ponto essencial no monitoramento de restauração e ainda pouco explorado para esse fim (VICENTE; SOUZA-FILHO, 2011).

O monitoramento da restauração também deve passar por elementos de avaliação da paisagem, como conectividade e efeito de borda, que devem ser levadas em conta nas futuras edições deste Protocolo. A conectividade é importante para aumentar as chances de pleno retorno das funções ecológicas, ou mesmo para aumentar as chances de sucesso de áreas de baixo potencial para restauração (TAMBOSI et al., 2014). Outro be-

nefício proporcionado por estudos de conectividade é a otimização do planejamento de corredores ecológicos, o que caracteriza um planejamento de restauração em larga escala (WICKHAM et al., 1999; RIBEIRO et al., 2009; TAMBOSI et al., 2014; HADDAD et al., 2015).

Além da conectividade, o planejamento da Restauração de Ecossistemas também deve levar em conta o efeito de borda, pois sabe-se que as características da vegetação nas divisas com áreas antropizadas (bordas das áreas) diferem dos trechos centrais dos fragmentos vegetados (GEHLHAUSEN; SCHWARTZ; AUGSPURGER, 2000; RUZICKA; GRONINGER; ZACZEK, 2010). Ou seja, o planejamento da Restauração de ecossistemas deve, sempre que possível, envolver áreas menos esbeltas e de maior distância entre lados opostos do seu perímetro (RIBEIRO et al., 2009; HADDAD et al., 2015).

Para avaliação da conectividade, efeitos de borda e elementos da paisagem, recomenda-se o uso do *software* gratuito LS Metrics <https://github.com/LEEClab/LS_METRICS> e para avaliação de corredores ecológicos recomenda-se o *software* gratuito LS Corridors <https://github.com/LEEClab/LS_CORRIDORS>. Mattos et al. (2021) mostram que também é possível avaliar paisagens por um plugin no QGIS.

Outras informações relevantes sobre biodiversidade no polígono de interesse podem ser verificadas na base de dados reunida pelo UNBiodiversity Lab⁹, uma iniciativa associada à Organização das Nações Unidas. Nesta base de dados, é possível fazer o download das camadas de interesse e, num ambiente SIG, verificar as informações correspondentes ao polígono da área do projeto. Porém, vale ressaltar que esta base de dados deve ser utilizada como estimativa devido à resolução dos sensores orbitais utilizados. Tais estimativas podem auxiliar a tomada de decisões antes de ir a campo, ou mesmo complementar informações obtidas após o campo ou por outros sensores.

9 <<https://map.unbiodiversitylab.org/earth>>