



Como os Produtos MODIS têm sido Utilizados para Análise dos Parâmetros Biofísicos em Regiões Semiáridas? Uma Revisão Bibliométrica e de Literatura

How Have MODIS Products been Used to Analyze Biophysical Parameters in Semi-arid Regions? A Bibliometric and Literature Review

Alan César Bezerra¹, Geber Barbosa de Albuquerque Moura², Pabrcio Marcos Oliveira Lopes², Eberson Pessoa Ribeiro³, Josicléda Domiciano Galvêncio⁴ e Edimir Xavier Leal¹

¹ Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Serra Talhada-PE, Brasil. E-mail: alan.bezerra@ufrpe.br, edimirferraz@outlook.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9986-9464>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3151-8916>

² Universidade Federal Rural de Pernambuco – Departamento de Agronomia, Recife-PE, Brasil. E-mail: geber.moura@ufrpe.br, pabrcio.lopez@ufrpe.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9073-8145>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8268-747X>

³ Instituto Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil. E-mail: eberson_pessoa@yahoo.com.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8316-6505>

⁴ Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil. E-mail: josicleda.galvencio@ufpe.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7367-6587>

Recebido: 03.2022 | Aceito: 08.2022

Resumo: O sensoriamento remoto é uma tecnologia que permite o monitoramento do ambiente com baixo custo e alta periodicidade, sendo os produtos do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) um dos mais utilizados. Assim, busca-se apresentar as aplicações do sensor MODIS e os padrões sazonais das formas de uso e cobertura da terra na análise com parâmetros biofísicos em regiões de semiárido, sendo dividida em três seções: a primeira sobre o sensor MODIS, explicando suas características; a segunda é uma revisão bibliométrica da aplicação de parâmetros biofísicos obtidos com MODIS em ambiente semiárido; por fim, na terceira sessão, contextualiza os métodos de detecção das mudanças de uso e cobertura da terra. Para isso, a base de dados utilizada foi a *Web of Science* (WOS), que possui acesso a base de dados como ProQuest, Scopus e Wiley. O período considerado foi de 2000 até 2019 e as palavras chaves pesquisadas foram: MODIS, Semiárido e Biofísico. Com esta revisão, concluiu-se que o sensor MODIS pode oferecer relevantes produtos para o monitoramento ambiental, destacando-se o MOD13, MYD13, MOD09, MOD11, MCD 15, MCD43, MCDB3, MOD16 e MOD17. Os estudos que buscam verificar os impactos das mudanças climáticas necessitam ser cautelosos nas análises dos resultados obtidos, em razão da contaminação dos produtos por fatores atmosféricos. Ademais, para avaliar as mudanças ocorridas em uma região, alguns estudos priorizam o uso da estatística descritiva das imagens e as perspectivas futuras deverão considerar o uso de análise de tendências temporais a uma coleção de produtos do sensoriamento remoto.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Monitoramento ambiental. Sensoriamento remoto.

Abstract: Remote sensing is a technology that allows the monitoring of the environment with low cost and high periodicity, being the product of the *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), one of the most used. Thus, we seek to present the applications of the MODIS sensor and the seasonal patterns of land use and land cover forms in the analysis with biophysical parameters in semi-arid regions, being divided into three sections: the first is about the MODIS sensor, explaining its characteristics; the second is a bibliometric review of the application of biophysical parameters obtained with MODIS in a semi-arid environment; finally, the third session contextualizes the methods of detection of land use and land cover changes. For this, the database used was the *Web of Science* (WOS), which has access to databases such as ProQuest, Scopus, and Wiley. The period considered was from 2000 to 2019, and the keywords searched were: MODIS, Semi-arid, and Biophysical. With this review, it was concluded that the MODIS sensor could offer relevant products for environmental monitoring, highlighting MOD13, MYD13, MOD09, MOD11, MCD 15, MCD43, MCDB3, MOD16, and MOD17. The studies that seek to verify the impacts of climate change need to be cautious in analyzing the results obtained due to the contamination of products by atmospheric factors. Furthermore, to evaluate the changes in a region, some studies prioritize using descriptive statistics of the images. Future studies should consider using time trend analysis in a collection of remote sensing products.

Keywords: Climate change. Environmental monitoring. Remote sensing.

1 INTRODUÇÃO

Os ecossistemas apresentam mudanças contínuas e, em condições naturais, elas se sucedem de maneira equilibrada e lenta. Eles apresentam uma dinâmica de modificação da cobertura da terra devido às variações climáticas e intervenções humanas. Contudo algumas ações antrópicas, principalmente, pela exploração de forma indiscriminada de recursos naturais, afetam diversos processos ecológicos que interagem entre si na superfície terrestre (VIEIRA; RAMOS; TIEPPO, 2021). Essas alterações provocam mudanças nas dinâmicas dos ecossistemas com consequências em níveis ambientais, sociais e econômicos.

Outro fator que tem aumentado as preocupações globais diz respeito as mudanças climáticas e, conseqüentemente, as alterações no regime de chuvas e temperatura, provocando alterações na fenologia das plantas, funcionamento de ecossistemas e na distribuição da biodiversidade. As fortes alterações no regime de chuvas em todas as regiões do país exigem soluções para minimizar os problemas socioeconômicos advindos das secas mais fortes e frequentes, e inundações extremas em grandes áreas. Havendo necessidade de estudos nesses aspectos, visto que os impactos das mudanças climáticas estão se acelerando rapidamente (ARTAXO, 2020).

A degradação dos ecossistemas, em qualquer bioma, pode ocasionar sérios problemas, mas em regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas, isso é ainda mais impactante. Essas regiões apresentam uma maior propensão aos eventos extremos de seca, devido à irregularidade das chuvas e altas temperaturas, apresentando tendências de processos de desertificação, podendo ser intensificado com as mudanças climáticas (TAVARES; ARRUDA; SILVA, 2019). Portanto, a compreensão dos padrões espaciais sazonais das mudanças ocorridas de uso e cobertura da terra, permite identificar modificações potencialmente prejudiciais aos ecossistemas e realizar previsões das consequências sociais, econômicas e ambientais.

Para compreender essas mudanças podem ser utilizadas informações em campo, que exigem altos custos econômicos e esbarram nas limitações técnicas, devido ao fato de apresentar informações pontuais (NANZAD et al., 2019), o que dificulta uma compreensão das mudanças no espaço. Dessa forma, o sensoriamento remoto é uma alternativa interessante para esse tipo de estudo, porque permite mensurar em escalas espaciais e temporais, as condições de mudanças dos ecossistemas.

Essa tecnologia utiliza equipamentos, chamados de sensores, a bordo de satélites, aeronaves ou torres, que captam a interação da energia eletromagnética em uma região, no qual cada sensor possui suas características temporais, espaciais, radiométricas e espectrais. A partir do conhecimento da interação da energia eletromagnética e as informações captadas pelos sensores, se realiza a inferência dos tipos de cobertura e suas condições (NOVO, 2010).

Diferentes tipos de sensores já foram utilizados para os estudos de mudanças ambientais, como os *Advanced Very High Resolution Radiometer – AVHRR* - (WU et al., 2021), *Land Remote Sensing Satellite – Landsat*- (SILVA et al., 2019), *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – MODIS*- (ORIMOLOYE et al., 2021), entre outros. Atualmente, o MODIS possui algumas características mais vantajosas para essa aplicação em extensões regionais, pois tem tempo de revisita de 1 a 2 dias, e alguns dos seus produtos são uma composição temporal com base no melhor valor da refletância do pixel (DIDAN; BARRETO MUNOZ, 2019).

Dessa maneira, é fundamental conhecer as principais aplicações e os padrões sazonais das formas de uso e cobertura da terra desenvolvidas que permitem o acompanhamento das mudanças dos ecossistemas em regiões semiáridas. Buscando atender a essa necessidade, essa revisão da literatura pretende compreender as principais aplicações do MODIS nessa temática, sendo dividida em três seções, a saber: (1) Sensor MODIS, explicando as principais características e seus produtos; (2) Revisão Bibliométrica da aplicação de parâmetros biofísicos com MODIS em ambientes semiáridos no globo; e (3) Métodos de detecção das formas de uso e cobertura da terra.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Sensor MODIS

Entre os diferentes conjuntos de satélites e sensores em funcionamento, o MODIS está presente nos satélites TERRA e AQUA, ambos pertencentes ao programa de pesquisas de observação espacial do *Earth Observing System* (EOS), financiado pela NASA *Earth Science Enterprises* (ESE) (RUDORFF; SHIMABUKURO; CEBALLOS, 2007). Esse programa tem como meta principal a determinação das mudanças climáticas do planeta e as consequências das ações antrópicas na natureza. Dessa forma, é feito um monitoramento global permanente, permitindo entender as mudanças globais.

O satélite TERRA é um projeto de pesquisa que fornece dados globais do planeta e suas interações, tendo cinco (5) sensores a bordo: ASTER, CERES, MISR, MOPITT e MODIS. O TERRA está em órbita desde 18 de dezembro de 1999 e com passagem pela linha do Equador no horário próximo das 10h30min da manhã e a fase de coleta de dados iniciou em fevereiro de 2000.

Por sua vez, o satélite AQUA possui como objetivo analisar a precipitação, evapotranspiração e ciclo da água, tendo seis (6) sensores a bordo: AIRS, AMSR-E, AMSU-A, CERES, HSB e MODIS. Esse satélite foi lançado no dia 02 de maio de 2002 e passa pela linha do Equador no horário aproximado das 13h30min da tarde e a coleta de dados iniciou em julho de 2002.

No que tange ao MODIS, esse equipamento busca atender três (3) áreas de estudos: atmosfera, oceano e terra, com bandas de resolução espacial e espectral selecionados para diversas necessidades oferecendo dados diariamente (JUSTICE et al., 2002), além de atender também à Criosfera. O quadro 1 apresenta os produtos do MODIS ligados à superfície terrestre.

Quadro 1 – Produtos do Sensor MODIS para a superfície terrestre.

Terra	
MOD09/MYD09	Refletância da Superfície
MOD11/MYD11	Temperatura e Emissividade da superfície terrestre
MOD21/MYD21	Emissividade da superfície terrestre (Novo)
MCD12	Cobertura da Terra/Mudança da Cobertura da terra
MOD13/MYD13	Índices de Vegetação (NDVI e EVI)
MOD14/MYD14	Anomalias termais, fogos e queimadas
MOD15MYD15	Índice de área foliar e FPAR
MOD16/MYD16	Evapotranspiração
MOD17/MYD17	Fotossíntese líquida e Produtividade primária
MCD43	Distribuição Bidirecional de Refletância Função e Albedo
MOD44B	Campo de Vegetação Contínua
MDC46	Área Queimada
MOD44W	Máscara de Água

Elaboração: Os autores (2022).

Alguns desses produtos apresentam resoluções espaciais de 250, 500 e 1000 m. Os satélites passam de 1 a 2 dias pela superfície terrestre e os produtos fazem uma composição de 8 (oito) e 16 (dezesseis) dias, outros mensais e anuais, a depender nível de processamento, sendo essa composição feita a partir da menor cobertura de nuvens possível, baixo ângulo de visada e o maior valor (GARCÍA-MORA et al., 2012).

2.1 Revisão Bibliométrica

Uma vez compreendidas as características técnicas do sensor MODIS, essa etapa da revisão pretende explorar os estudos realizados utilizando dados deste sensor aplicados em ambientes semiáridos, considerando o limite temporal do ano 2019. Nesse sentido, aplicou-se uma análise bibliométrica, pois permite entender a

dinâmica de disseminação do conhecimento científico em uma determinada área e possui uma abordagem quantitativa. Além disso, possibilita entender as tendências das pesquisas e publicações científicas, os temas, autores e instituições com maior destaque (SANTOS SILVA et al, 2019).

Para a realização dessa etapa, a base de dados que serviu como fonte de obtenção do estudo foi a *Web of Science* (WOS). A escolha dessa base é devido à sua abrangência em nível mundial de pesquisas, com mais de 12.000 periódicos indexados e classificados com o fator de impacto do *Journal Citation Reports* (JCR), e por conseguir acessar outras bases de dados, tais como ProQuest, Scopus e Wiley (PEREIRA et al., 2013). O período utilizado como recorte temporal foi de 2000 até 2019, sendo a busca desenvolvida em fevereiro de 2020.

As palavras chaves pesquisadas foram: MODIS, semiárido e Biofísico, contudo, essas palavras foram traduzidas para o inglês antes de iniciar as buscas, em virtude da abrangência da língua inglesa no mundo. A pesquisa buscou apenas artigos científicos e artigos de revisão publicados em jornais e periódicos, sendo feita nos títulos, resumos e palavras-chaves. A análise e visualização dos dados foram desenvolvidos em ambiente R com uso do pacote Bibliometrix (ARIA; CUCCURULLO, 2017) que permite extrair informações básicas da base de dados e geração de matrizes sobre co-citações, colaboração científica, co-palavra e acoplamentos.

Buscando entender melhor a aplicação do sensor MODIS nos estudos científicos nas áreas semiáridas com parâmetros biofísicos, realizamos uma evolução da pesquisa dos termos. Percebe-se (Quadro 2) que a comunidade científica aplica esse sensor em diferentes ambientes e com diferentes abordagens, com mais de 23.000 publicações, entre artigos de periódicos, revisão, anais de congressos, capítulos de livros etc., com publicações a partir de 2001.

Quadro 2 – Análise da quantidade de publicações com a evolução da cadeia de caracteres no período entre 2000 e 2019.

Cadeia de Caracteres	Número de Publicações
MODIS (<i>"MODIS"</i>)	23.035
MODIS e Semiárido (<i>"MODIS" AND ("semiarid" OR "semi-arid")</i>)	875
MODIS e Biofísico (<i>"MODIS" AND "biophysical"</i>)	681
MODIS, Semiárido e Biofísico (<i>"MODIS" AND "biophysical" AND ("semiarid" OR "semi-arid")</i>)	52

Elaboração: Os autores (2022).

Ao detalhar melhor os termos do âmbito da pesquisa, percebe-se que o termo biofísico se apresenta como um critério de corte maior, uma vez que a diferença de publicações entre as buscas de “MODIS e Semiárido” e “MODIS e Biofísico” foi 194. Contudo, ambos os termos representam quantidades pequenas das aplicações com o MODIS, correspondendo 3,8% para “MODIS e Semiárido” e 3% para “MODIS e Biofísico”, o que indica que tanto a área de estudo e a modelagem dos parâmetros biofísicos não estão entre as aplicações mais usuais com esse sensor. Ao restringir para as três palavras-chaves da pesquisa, o retorno foi um total de 52 publicações, o que corresponde a 0,2% das publicações com o sensor MODIS.

A Tabela 1 apresenta os dados básicos das publicações e mostra que a parte mais significativa das publicações iniciou a partir de 2003, com uma concentração maior dos artigos publicados em periódicos (95%), não havendo publicações do tipo revisão sobre o tema. A restrição nas publicações nesse período pode ser justificada pelo tempo de disponibilidade e divulgação dos dados oriundos do sensor MODIS, no qual era necessário ferramentas e recursos computacionais específicos para trabalhar com os dados. Portanto, o uso dos dados e eventuais publicações eram restritas neste período inicial. Além disso, percebe-se que os estudos em ambientes semiáridos com os produtos dos MODIS e parâmetros biofísicos são restritos em nível mundial e com uma concentração maior de artigos publicados em inglês.

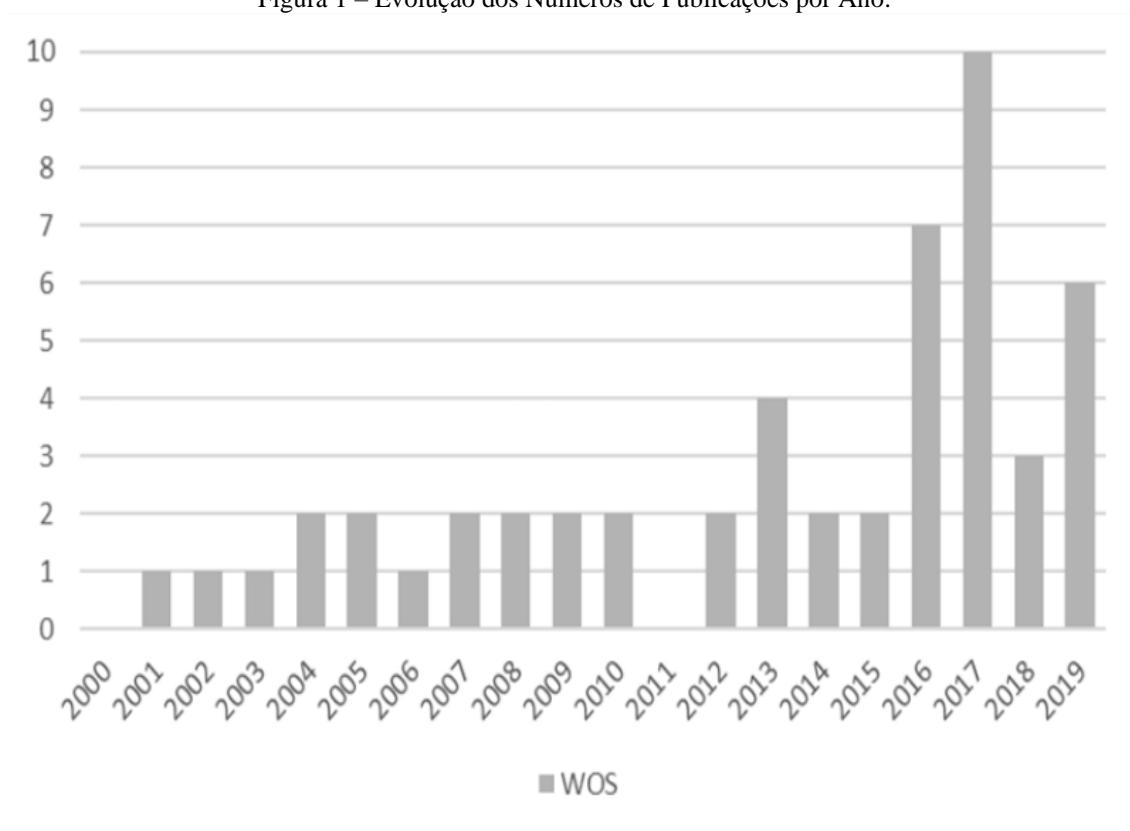
Tabela 1 – Informações básicas das publicações na base Web of Science (WOS).

Descrição	WOS
Documentos	52
Palavras-chaves plus	29
Palavras-chaves dos Autores	287
Período	168
Média de Citação por documento	2001-2019
Autores	89,17
Aparições do Autor	234
Documentos por Autor	277
Autores por Documentos	1
Coautores por documentos	233
Tipos de Documentos	
Artigos	43
Artigos de Conferência	1
Anais de Conferência	8

Elaboração: Os autores (2022).

Ao analisar a evolução das publicações (Figura 1), os primeiros artigos são posteriores a 2001, um ano após a disponibilização das imagens do sensor MODIS que ocorreu no ano 2000. No período inicial, a taxa de publicação é de um artigo por ano e, em 2004, aumenta-se para duas publicações ao ano até meados de 2013. Nesse período, o ano de 2011 foi o único que não houve publicações dentro do tema em questão. Em 2013 o número de publicações aumenta para 4 e inicia um período irregular de publicações, mas com uma tendência de aumento. Nesse último período, o ano de 2017 possui a maior quantidade de artigos publicados.

Figura 1 – Evolução dos Números de Publicações por Ano.



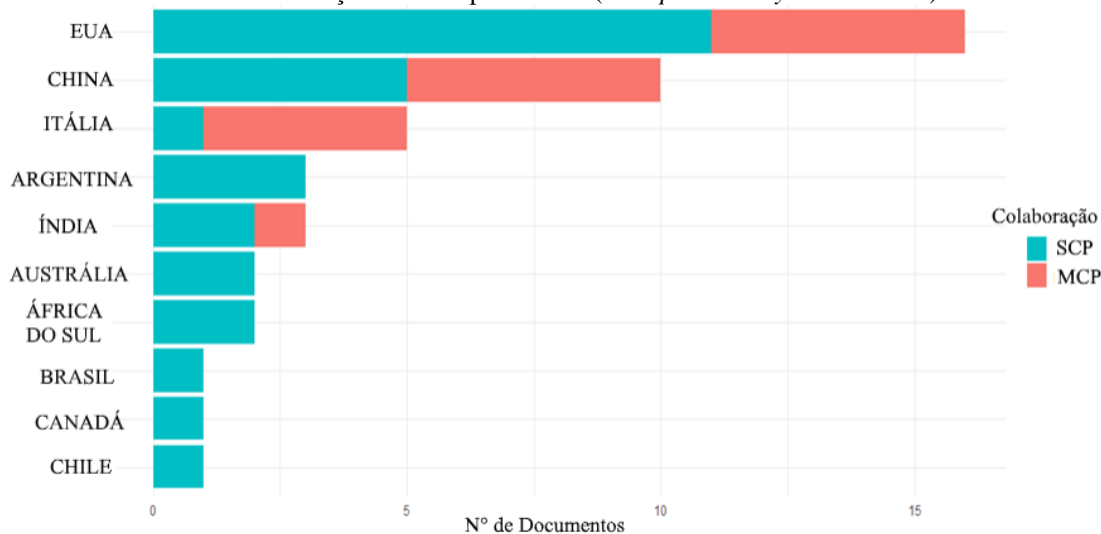
Elaboração: Os autores (2022).

A primeira década (2000-2009) possui 27% do total de publicações do período, enquanto a segunda década (2010-2019) concentra os 73%. Dessa maneira, percebe-se uma atenção mais recente da comunidade

científica com o uso deste sensor em ambientes semiáridos e com uso dos parâmetros biofísicos. Provavelmente, esse aumento de publicações na segunda década é devido à formação de uma base de dados mais consistente, no mínimo 10 anos, e melhoria dos equipamentos e metodologias das análises que permitem um acompanhamento mais adequado das mudanças das formas de uso e cobertura da terra.

Ao verificar os países com mais publicações (Figura 2), percebe-se o predomínio dos Estados Unidos da América e China. Nesses países, a maior parte das publicações é com autores do mesmo país, mas apresentam uma quantidade de publicações em conjunto com outros países. Diferente do terceiro país com mais publicações, Itália, em que se predominam artigos com colaboração de diferentes países, sendo o único país da Europa na lista dos 10 países com mais publicações na base de dados. O continente sul-americano possui a maior quantidade de países envolvidos em publicações no tema em questão, sendo a primeira Argentina, seguida do Brasil e Chile, com os artigos sendo desenvolvidos na região de Chaco e semiáridos nordestinos. No continente africano, a África do Sul é o país com maior destaque na área e na Oceania a Austrália.

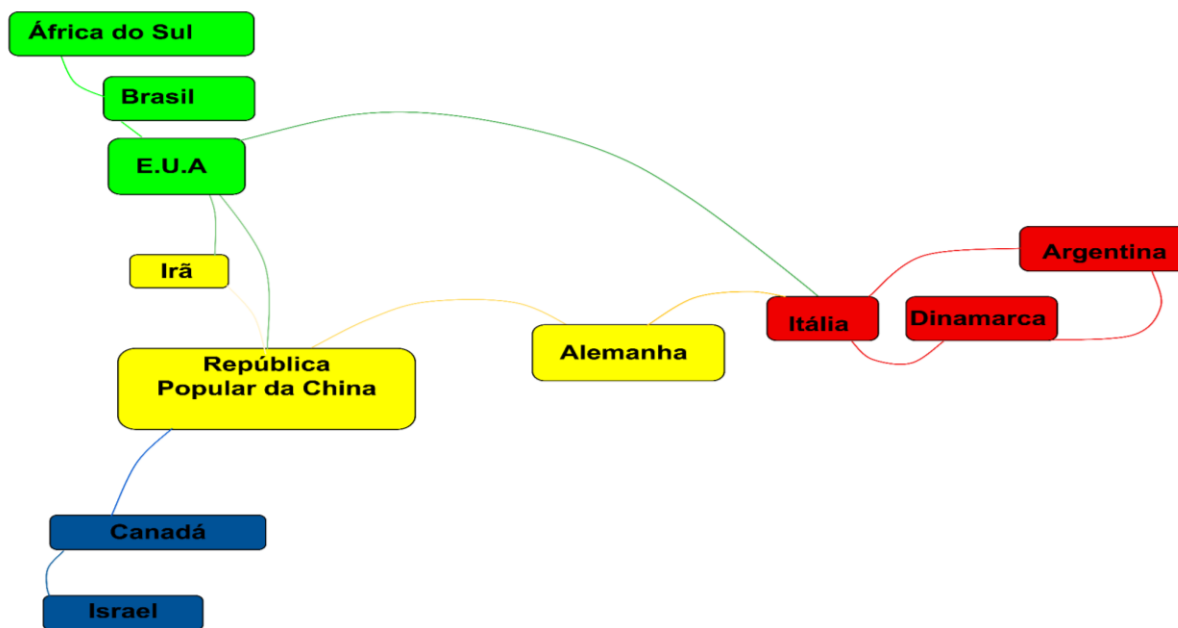
Figura 2 – Relação dos Países com mais publicações: SCP - Publicações de País Único (*Single Country Publications*); MCP - Publicação de Múltiplos Países (*Multiple Country Publications*).



Elaboração: Os autores (2022).

Ao observar a relação dos países (Figura 3), os EUA têm uma aproximação com o Brasil e África do Sul, além de uma conexão com a China e Itália. Por sua vez, a China, segunda maior em publicações, mantém as conexões com EUA e Itália e, ainda, tem conexões com Alemanha, Irã, Canadá e Israel. Por fim, a Itália possui conexões com Dinamarca e Argentina, além dos países citados anteriormente.

Figura 3 – Relação dos Autores da área temática e seus países de Origem.



Elaboração: Os autores (2022).

A Tabela 2 apresenta algumas das referências mais utilizadas para as publicações da área temática, sendo um artigo, oriundo da própria base de dados, desenvolvido por Huete et al. (2002) que avaliou os produtos dos índices de vegetação do MODIS, o mais citado na própria base de dados. Esse artigo é, inclusive, o mais citado em outras publicações que tratam sobre a utilização do MODIS.

Tabela 2 – Referências mais utilizadas nas publicações da base de dados e Publicações mais citadas da base de dados – Citação Total (CT) e Citação Total Anual (CTA).

Referências mais utilizadas		Publicações mais citadas		
Publicações	CT	Publicações	CT	CTA
Huete et al. (2002)	10	Huete et al. (2002)	3600	189,474
Tucker (1979)	9	Archibald e Scholes (2007)	150	10,714
Justice et al. (1998)	8	Gebremichael e Barros (2006)	89	5,933
Monteith (1972)	7	Stefanov e Netzbund (2005)	64	4
Zhao et al. (2005)	7	Cheng et al. (2008)	58	4,462
Asrar et al. (1984)	6	Haashemi et al. (2016)	50	10
Fensholt, Sandholt e Rasmussen (2004)	6	Fensholt (2004)	50	2,941
Huete (1988)	6	John et al. (2008)	47	3,615
Mu, Zhao e Running (2011)	6	Yang et al. (2007)	43	3,071
Schaaf et al. (2002)	6	Hu e Jia (2015)	42	7

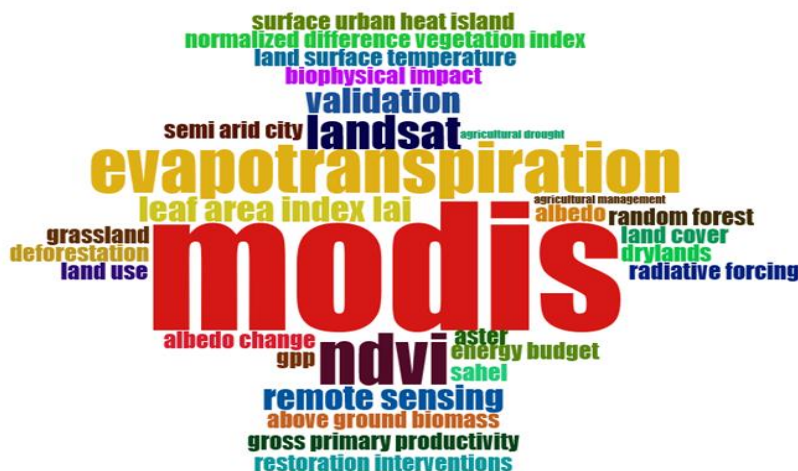
Elaboração: Os autores (2022).

Ao analisar as publicações mais citadas da base de dados, percebe-se uma predominância de trabalhos da primeira década de 2000, em que houve uma quantidade maior de trabalhos que avaliaram e validaram os parâmetros biofísicos dos MODIS, o que serve de base para outros estudos com o sensor.

A Figura 4 apresenta a nuvem de palavras-chaves mais utilizadas dos autores e percebe-se algumas características chaves nos estudos com MODIS. O *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) é o principal índice de vegetação citado, em conjunto com o Índice de Área Foliar, Albedo, Temperatura da Superfície, Evapotranspiração e Produtividade Primária Bruta. É importante destacar que mesmo o NDVI sendo o principal parâmetro utilizado, o estudo base deste índice, desenvolvido por Rouse et al. (1973), é pouco citado nos estudos com MODIS, conforme apresentado na tabela 2. Provavelmente, isto decorre do uso predominante do produto MOD13 para análise deste parâmetro que foi avaliado por Huete et al. (2002). Dessa forma, como os estudos tendem a utilizar mais este produto, por consequência, citam mais este estudo, ao invés do estudo base deste índice.

Outro grupo de palavras busca retratar as características do ambiente do semiárido, como as palavras de *grassland*, *dryland* e *semi-arid*. Por fim, um grupo de palavras expressa as características das forças atuantes na superfície terrestre, tais como desflorestamento, intervenções para restauração, uso de solo, cobertura de solo, ilhas de calor, seca agrícola, validação e manejo agrícola.

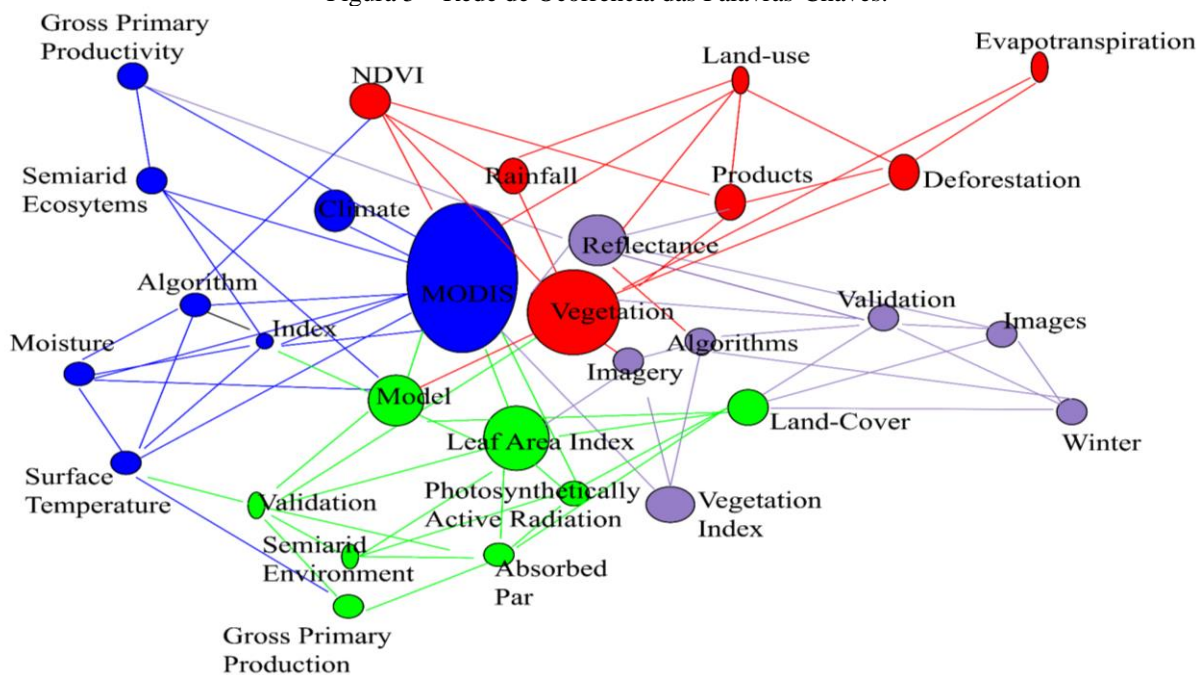
Figura 4 – Nuvem de Palavras Vinculadas por Palavras-Chaves dos Autores.



Elaboração: Os autores (2022).

Com o intuito de compreender melhor as conexões dos termos utilizados nas palavras-chaves das publicações, montou-se uma rede de ocorrência de um universo de 287 palavras-chaves (Figura 5). O resultado indica a formação de quatro grupos diferentes. O primeiro grupo, em azul, trata da caracterização do ecossistema semiárido. O segundo grupo, em vermelho, trata das características de uso da terra. O terceiro grupo, em verde, trata sobre a validação dos produtos dos parâmetros biofísicos. Por fim, o quarto grupo, em lilás, trata sobre as características dos produtos MODIS.

Figura 5 – Rede de Ocorrência das Palavras-Chaves.

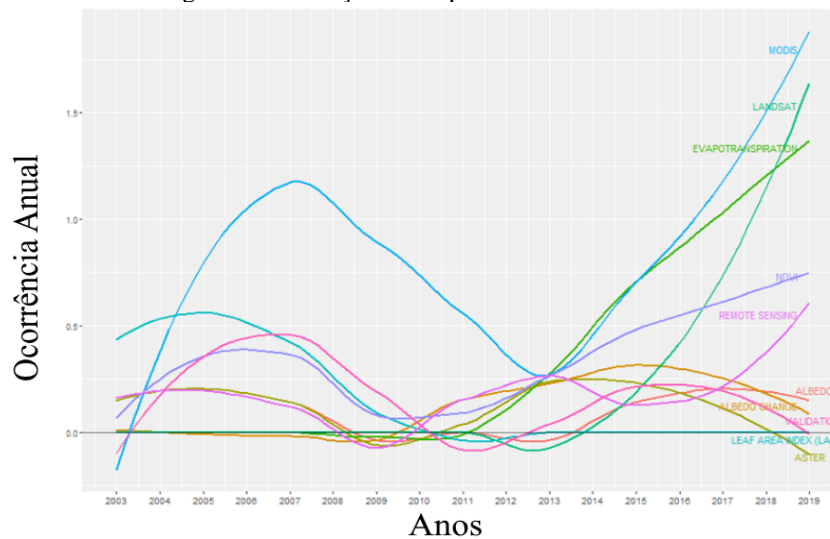


Elaboração: Os autores (2022).

Ao analisar as mudanças dos tópicos de interesse na base de dados (Figura 6), percebe-se um aumento recente do MODIS, LANDSAT, evapotranspiração e NDVI. Esses resultados indicam uma tendência dos

estudos em associar os produtos do sensor MODIS com os produtos Landsat, que também fornece imagens da superfície terrestre com uma melhor resolução espacial (30 m). Por sua vez, a evapotranspiração - parâmetro importante para o balanço hídrico local e, em regiões semiáridas - e o NDVI - que permite estimar a cobertura vegetal da superfície terrestre - são os parâmetros biofísicos com maior aplicação em estudos nos anos recentes que têm buscado dar mais ênfase às questões hídricas e à cobertura vegetal.

Figura 6 – Evolução dos tópicos na base de dados.



Elaboração: Os autores (2022).

Por outro lado, há uma diminuição no interesse dos tópicos relacionados ao albedo, validação e ASTER. O ASTER é um sensor que fornece a temperatura, refletividade, emissividade e altimetria da superfície terrestre, com resolução de 15, 30 e 90 m. Provavelmente, a diminuição do uso desse tópico se deve ao conhecimento do seu comportamento e relação com os produtos MODIS. Albedo é um parâmetro interessante para identificar o tipo de cobertura da terra, pois essa característica reflete na condição do balanço de radiação. Contudo, percebe-se que nunca houve um forte interesse na avaliação desse parâmetro na base de dados, uma vez que a ocorrência anual no período avaliado, 2000 até 2019, não passou de 0,5. Enquanto a validação está associada com a comparação das medidas dos parâmetros biofísicos obtidos dos índices espectrais das imagens com as medidas obtidas em *in situ* com equipamentos adequados.

2.2 Métodos de Detecção das Mudanças das Formas de Uso e Cobertura da Terra

A região semiárida apresenta uma resposta rápida aos eventos meteorológicos e dessa forma a dinâmica nesses ambientes é bem acentuada. Portanto, as pesquisas para compreensão das mudanças dos padrões das formas de uso e cobertura da terra apresentam uma variedade de parâmetros biofísicos, escalas espaciais e temporais e técnicas de análise, a depender da finalidade. No intuito de entender melhor cada aspecto, essa seção será dividida nos seguintes tópicos: Parâmetros Biofísicos, Escala Espaço-Temporal e Técnicas de Análise.

2.2.1 PARÂMETROS BIOFÍSICOS

A superfície terrestre é composta por diferentes elementos, entre eles: vegetação, solo, microrganismos, entre outros; que interagem entre si formando o ecossistema. As estruturas das coberturas das terras, a superfície terrestre, respondem de maneiras diferentes à radiação eletromagnético solar e resulta em diferentes trocas de energia. Portanto, esse conhecimento pode auxiliar na identificação e monitoramento das condições físico-químicas e biológicas (PADOVANNI et al., 2018). Assim, parâmetros biofísicos, variáveis que indicam o tipo de estrutura e condição biológica – tipo e estrutura da vegetação – e física – o tipo e cobertura da terra, são utilizados para as pesquisas de mudanças das formas de uso e cobertura da terra.

Visando ao monitoramento das mudanças de uso e cobertura da terra, diferentes indicadores podem ser usados na avaliação da condição da vegetação e da superfície (ZHANG; OKIN; ZHOU, 2019). Diferentes índices biofísicos podem ser aplicados para o monitoramento da condição da vegetação, o NDVI é o mais utilizado (ECKERT et al., 2015; HOUSPANOSSIAN et al., 2017; ARAÚJO et al., 2018; ZOUNGRANA et al., 2018), sendo que os produtos MOD13 e MYD13 os índices de vegetação prontos para uso. Enquanto outro produto utilizado foi o MOD09 que fornece as refletâncias em sete bandas e com base nos produtos da refletância do vermelho e infravermelho, calcularam o NDVI.

Outro índice bastante utilizado é *Enhanced Vegetation Index* (EVI), desenvolvido para as regiões com alta biomassa, a exemplo das Florestas Tropicais, auxiliando também na redução da influência das condições atmosféricas (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012). Em regiões semiáridas, os estudos aplicaram esse índice em áreas com vegetação nativa do Cerrado ou área de transição entre Cerrado/Caatinga (BORGES; SANO, 2014; NERY et al., 2014), sendo usado o produto MOD13 nesses trabalhos.

Outro índice de vegetação bastante utilizado em regiões semiáridas é o *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) ou Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS), o qual busca identificar a resposta vegetativa da superfície, diminuindo o efeito da resposta espectral do solo. Para tanto, esse índice costuma usar um fator de ajuste “L” para retirar esse efeito na radiação eletromagnética, sendo interessante para regiões semiáridas que apresentam uma vegetação mais esparsa e o solo mais exposto. Contudo, nessas regiões, quando utilizado o MODIS, poucos estudos empregaram essa variável como o de Alves *et al.* (2014) que aplicaram esse parâmetro em uma bacia hidrográfica e analisaram um conjunto com dados do NDVI e Albedo, todos obtidos a partir do produto MOD09, com o objetivo de identificar o comportamento sazonal desses índices na área de estudo.

Provavelmente, o pouco uso do SAVI em regiões semiáridas se deve ao fato da necessidade de obtenção do produto MOD09, seguido do processamento das imagens. Dessa forma, aumenta-se o tempo de processamento e suscetibilidade a erros. Devido ao fato do produto do MODIS para a vegetação, MOD13, já disponibiliza o NDVI e EVI, que são índices que também respondem adequadamente às análises desejadas, os estudos tendem a utilizar mais esses últimos dois índices.

A depender do tipo de cobertura da terra, se prevalece a vegetação, solo exposto ou áreas edificadas, a radiação proveniente do sistema solar é refletida em proporções diferentes, denominado Albedo que é essa taxa de refletividade da radiação. Em caso de desmatamento e aumento do solo exposto, o valor do albedo aumenta, enquanto o aumento da umidade do solo e densidade da vegetação diminui (ROBINOVE et al., 1981).

O MODIS possui um produto, MDC43, que fornece os valores de albedo para diferentes bandas, além do Albedo *Black Sky*: condição de iluminação direta e Albedo *White Sky*: condição de iluminação difusa. Outra possibilidade, para obtenção do Albedo, é sua determinação a partir do produto de refletância (MOD09) e emprego de pesos para cada banda para o seu cálculo (LIANG, 2001; TASUMI et al., 2008).

O Albedo é um parâmetro biofísico que auxilia a entender a estrutura física da superfície, mas deve ser utilizado em conjunto com outros como, em geral, índices de vegetação (NDVI, EVI e SAVI) e temperatura da superfície (MATOS et al., 2013; SANTOS et al., 2017). Esses estudos detectaram as relações inversas do Albedo com índice de vegetação e relação direta com a temperatura. Portanto, a retirada da vegetação favorece o aumento do Albedo que altera o saldo de radiação na superfície.

Houspanossian et al. (2017) alertam que a alteração do balanço de energia, seja nas ondas longas ou curtas, pode afetar também o clima atmosférico mais complexo, como diminuição de nuvens em áreas úmidas e maior evapotranspiração das águas precipitadas em regiões semiáridas e áridas. Dessa forma, outros estudos avaliaram Saldo de Radiação e Evapotranspiração Real que são parâmetros regulados pelo tipo de cobertura da terra e são analisados em conjunto com os outros parâmetros biofísicos (OLIVEIRA et al., 2014).

Ainda sobre a Evapotranspiração, um parâmetro dependente do saldo de radiação, mas que tem influência sobre o ciclo hidrológico e disponibilidade hídrica, alguns estudos mais recentes tem buscado compreender melhor seu comportamento e o produto MOD16 fornece a evapotranspiração diária. Além disso, esses estudos têm associado a evapotranspiração com a produtividade primária bruta (MOD17), isto é, compreender o balanço de carbono associado ao balanço hídrico, através do indicador de Eficiência de uso da água no ecossistema, ou *ecosystem water use efficiency* (WUE). Entre os estudos dessa área, destaca-se Tang

et al. (2017) que avaliaram a sazonalidade da evapotranspiração, produtividade primária bruta e WUE com os produtos MODIS e propuseram modelos alternativos para melhoria da estimativa. Por sua vez, Hu e Jia (2015) desenvolveram um modelo híbrido de estimativa de evapotranspiração real diária em uma bacia hidrográfica na China, denominado Etmonitor.

A temperatura da superfície terrestre é um outro parâmetro utilizado e serve como indicador do saldo de energia, devido ao fato de ser um elemento chave na física dos processos da superfície em escalas regionais e globais (CUNHA et al., 2015). Portanto, os estudos com esse parâmetro acompanham outras variáveis, como Albedo e Cobertura Vegetal, o que permite realizar inferências da estrutura física da cobertura da terra. Quanto menor a cobertura vegetal, maior é a Temperatura da Superfície e o produto desse parâmetro no MODIS é MOD11.

Outro índice com diferentes aplicações é *Normalized Difference Water Index* (NDWI) ou Índice de Água da Diferença Normalizada (IADN) proposto por Gao (1996) que avalia o teor de água das folhas e usa as faixas da radiação eletromagnética no infravermelho, uma banda centrada em aproximadamente 0,86 μm e outra em 1,24 μm . Os estudos em regiões semiáridas com esse parâmetro buscam monitorar a estrutura da cobertura vegetal, o estresse hídrico da vegetação e estimativas da quantidade de água nas plantas (RIBEIRO et al., 2015), sendo utilizado o produto nas refletâncias MOD09.

Para aprofundar a compreensão dos processos físicos relacionados aos parâmetros biofísicos utilizados no sensoriamento remoto, recomendamos uma revisão sobre modelos de solo-vegetação-atmosfera com base no sensoriamento remoto desenvolvido por Dorigo et al. (2007) que detalham vários dos parâmetros destacados anteriormente. Por sua vez, Ferreira, Ferreira e Ferreira (2008) avaliaram a evolução do sensoriamento remoto da vegetação, considerando os aspectos operacionais e científicos. Enquanto Indirabai et al. (2019) estudaram a aplicação dos parâmetros biofísicos na caracterização das florestas e detalham algumas das relações dos parâmetros biofísicos.

Além da identificação das modificações da cobertura da terra, esses parâmetros biofísicos também são usados para monitoramento da Seca, nas regiões semiáridas. A Seca é um evento climático que pode ocorrer em qualquer regime climático devido às irregularidades da precipitação, com consequências ao meio ambiente e aos seres humanos, em que Nanzad et al. (2019) recomendam usar a anomalia do NDVI. Em outro estudo, desenvolvido por Cunha et al. (2015), eles usaram *Vegetation Supply Water Index* (VSWI) ou Índice de Água de Abastecimento para Vegetação (IAAV), que é derivado do índice de vegetação NDVI e da temperatura da superfície terrestre para monitoramento das secas na região semiárida do Nordeste brasileiro.

As regiões semiáridas também apresentam uma maior propensão aos processos de desertificação, que seria um estado mais avançado de degradação dos solos ocasionado pelas condições climáticas adversas, como as severas secas, e sendo esses processos acelerados pelas atividades antrópicas. As consequências da desertificação afetam tanto nas dimensões sociais, econômicas e ambientais ao ecossistema e no Nordeste do Brasil. Um estudo de Tomasella et al. (2018) aplicaram os produtos NDVI do MODIS (MOD13) para identificar áreas mais degradadas no período de 2000 até 2016.

2.2.2 ESCALA ESPAÇO-TEMPORAL

Como visto anteriormente, o MODIS é um sensor presente em dois satélites, TERRA e AQUA, com uma passagem pelo planeta de 1 (um) a 2 (dois) dias e oferecem diferentes produtos voltados para superfície terrestre, oceânica e atmosférica que viabilizam a análise de áreas extensas em uma escala de tempo diária, sendo uma ferramenta interessante para estudos desta natureza.

Ao analisar os estudos desenvolvidos no semiárido brasileiro, percebe-se que, inicialmente, as análises se limitavam em bacias hidrográficas, microrregiões e mesorregiões (MATOS et al., 2013; NERY et al., 2014; RIBEIRO et al., 2015). Além disso, esses estudos usavam datas específicas para determinar os parâmetros biofísicos desejados durante um certo período de avaliação e as escolhas das datas se basearam na escolha de imagens com menor presença de nuvens. Os resultados apresentaram um panorama geral das mudanças ocorridas nos locais de estudo, contudo, as diferentes condições atmosféricas ocasionaram algum tipo de contaminação nas imagens, mesmo que mínimas.

Por outro lado, as análises recentes com os produtos MODIS têm sido mais regionais, em especial em toda a região Nordeste Brasileira (CUNHA et al., 2015; TOMASELLA et al., 2018) ou em nível estadual,

como Souza et al. (2015) que avaliaram o estado da Paraíba. Merecem também destaque Nanzad et al. (2019) que avaliaram em toda a Mongólia, Houspanossian et al. (2017) que analisaram a região semiárida de Chaco, entre os países da Argentina, Paraguai e Bolívia; e Zoungrana et al. (2018) que verificaram a tendência de resposta do NDVI em Burkina Faso, região oeste da África.

Esses estudos também utilizam uma base de imagens maior, formada por todas as imagens disponíveis no período de avaliação de interesse. Schucknecht *et al.* (2013) recomendam o uso de séries temporais, no lugar de imagens únicas, com o intuito de compreender a variabilidade inerente da vegetação durante o tempo e como a degradação da terra pode estar ocorrendo.

No Brasil, é interessante destacar uma iniciativa de uso dos produtos MODIS para monitoramento operacional de secas em nível nacional desenvolvido Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN. O CEMADEN disponibiliza mensalmente relatórios apresentando as condições de seca no Brasil. Além disso, eles também oferecem relatórios detalhando as condições de seca do semiárido. Este monitoramento apresenta resultados mensais das condições de seca através do Índice Integrado de Seca (IIS) que consiste na junção do Índice de Precipitação Padronizada (SPI), a Água Disponível no Solo (ADS) juntamente com o Índice de Suprimento de Água para a Vegetação (VSWI) ou com o Índice de Saúde da Vegetação (VHI), conforme metodologia apresentado por Alvalá et al. (2019). Destes produtos, o VSWI é estimado a partir dos produtos de NDVI e temperatura da superfície obtidos com o MODIS.

2.2.3 TÉCNICAS DE ANÁLISE

Para analisar as mudanças ocorridas em uma região, alguns estudos priorizam o uso de uma estatística descritiva da imagem e comparação dos valores de pontos em diferentes áreas de uso e cobertura da terra (MATOS et al., 2013; RIBEIRO et al., 2015; SOUZA et al., 2015). Esses estudos encontraram para áreas de caatinga valores médios do NDVI com uma variação maior – entre 0,2 e 0,7, por ser uma vegetação dependente da precipitação. Enquanto o albedo apresentou um valor próximo 0,16, mas variando de 0,11 até 0,2. Por sua vez, a temperatura da superfície tem uma dependência maior do satélite utilizado, se TERRA ou AQUA, uma vez que o tempo de passagem é diferente. Contudo, a temperatura da superfície tende a ficar na faixa de 30 até 40 °C.

Outras pesquisas tiveram o intuito de validar os dados obtidos por sensoriamento remoto com dados de referência terrestre e se valerem, além das análises anteriores (estatística descritiva), de uma avaliação da precisão e acurácia dos modelos. Como Santos et al. (2017) que avaliaram o saldo de radiação e albedo em duas áreas experimentais de Caatinga em Recuperação e Degradada. Para análise dos resultados obtidos com sensoriamento remoto, aplicaram Erro Médio Percentual (EMP), Erro Médio Absoluto (EMA), Erro Absoluto (EA) e Erro Percentual (EP), além de uma análise de regressão e teste t-Student para determinar a significância das correlações. Constataram a eficácia dos produtos de Albedo, sendo o resultado obtido pelo MCD43 mais satisfatório do que o albedo calculado pelo MOD09, nas duas áreas.

Rankine et al. (2017) compararam os produtos MODIS e índices de vegetação próxima à superfície obtidas com torres de fenologia ótica com intuito de monitorar a fenologia da floresta tropical seca, em uma área de semiárido. Eles concluíram que os produtos MODIS (MOD13Q1/MYD13Q1), do índice de vegetação, representam a fenologia deste ecossistema brasileiro para fins qualitativos, contudo não são recomendados para uma avaliação mais acurada e comparações interanuais de produtividade sazonal.

Por sua vez, Miranda et al. (2020) buscaram criar e testar novos modelos empíricos para estimativa do índice de área foliar (IAF) e índice de área de planta (IAP) usando um conjunto de dados de reflectância provenientes de diferentes épocas e do Landsat com dados de campo em uma área de Caatinga. Contudo, os autores também analisaram o desempenho de outros modelos da literatura a partir do Landsat e do produto MODIS (MOD15A3H/A2H), com intuito de comparar os modelos propostos no estudo. Destacando os resultados com produto MODIS, o IAF apresentou r^2 de 0,66 e 0,78 e erro quadrático médio de 0,57 e 0,46, respectivamente, para os produtos MOD15A3H e MOD15A2H.

Rankine et al. (2017) e Miranda et al. (2020) destacam a necessidade de atenção às questões da resolução temporal dos produtos MODIS, pois eles continuam apresentando vieses na estimativa dos parâmetros em razão das contaminações por fatores atmosféricos, seja por vapores de água, aerossóis e nuvens. Portanto, os estudos que buscam verificar os impactos das mudanças climática necessitam ser cautelosos nas análises dos resultados obtidos.

O uso da estatística descritiva das imagens e análise dos valores individuais dos pixels são análises adequadas para verificar o comportamento dos parâmetros biofísicos em datas específicas. Essas atividades requerem um baixo processamento computacional e análises estatísticas menos sofisticadas, contudo não são eficazes para compreender as tendências de mudanças de longo prazo graduais e abruptas da cobertura da terra. Diante disso, uma abordagem diferente deve ser feita e Eastman et al. (2009) propuseram um procedimento para análises das tendências ambientais em séries temporais de produtos oriundos do sensoriamento remoto.

Com a melhoria da capacidade de processamento de imagens e maior acesso a programas mais robustos, as pesquisas têm utilizado de análise de tendências temporais a uma coleção de produtos do sensoriamento remoto. Entre as técnicas mais utilizadas, se destacam o teste de tendência de Mann-Kendall e regressão linear entre parâmetros biofísicos com o tempo.

Nesse sentido, é importante destacar a plataforma de acesso livre *Google Earth Engine* (GEE) que possibilita visualizar e examinar dados espaciais que contém um catálogo de informações, de ordem multi-petabyte (GORELICK et al., 2017). Essa plataforma possui diferentes bibliotecas com os mais variados dados e com coleção de imagens, possibilitando o processamento em nuvem nos servidores da empresa. Com isso, têm-se duas vantagens primordiais, a visualização de grandes quantidades de dados e a velocidade no processamento das imagens.

O acesso ao GEE em questão é feito no próprio navegador de internet e baseia-se em uma interface para aplicação de programação (API – *Application Programming Interface*). Em seu ambiente, há uma biblioteca de comandos e operações pré-definidas que possibilita a melhor gestão, processamento e análise das informações disponíveis. Não foram encontrados na base de dados levantadas para revisão bibliométrica estudos com a aplicação desta plataforma, contudo é interessante destacar alguns estudos, especificando as aplicações no Brasil.

Destacam-se os estudos de Kalacska et al. (2019), os quais realizaram uma classificação multi-temporal na Bacia do Rio Xingu, usando imagens do sensor TM/Landsat 5 e OLI/Landsat 8, para identificar as dinâmicas de cobertura da terra e auxiliar a compreensão das pressões antrópicas na região de interesse ambiental. Por sua vez, outros estudos buscaram analisar as dinâmicas de cobertura de pastagens e a degradação dessas áreas usando a coleção de imagens do sensor MODIS (PARENTE & FERREIRA, 2018; PEREIRA et al., 2018).

Estudos desenvolvidos com o GEE na Região Nordeste ainda são escassos, mas se destaca o trabalho desenvolvido por Goldblatt, Ballesteros e Burney (2017) que aplicaram o uso de imagens com alta resolução espacial do satélite WorldView e média resolução do Landsat para classificação de uma área localizada no semiárida em três classes de cobertura: arbórea, arbustiva e solo exposto. Os resultados sugerem a viabilidade desse produto como forma de classificação das formas de cobertura da terra.

Os resultados obtidos nos trabalhos desenvolvidos ressaltam as vantagens dessa tecnologia para processamento de grandes quantidades de informações, possibilitando maior confiança nos resultados obtidos. Além disso, há uma margem significativa de aplicações e estudos nas regiões brasileiras, em especial, no Nordeste.

Em todos os estudos desenvolvidos, a visualização da cartografia temática dos parâmetros, independentemente do tipo de análise escolhida, auxilia a entender os pontos mais críticos e as mudanças ocorridas, sendo comum em todos os estudos. Por fim, o Quadro 3 apresenta um resumo das principais aplicações desenvolvidas com MODIS em regiões do Semiárido.

Quadro 3 – Resumo das Aplicações Utilizadas com Produtos MODIS na Região de Semiárido para caracterização das mudanças das formas de uso e cobertura da terra.

Componente	Tipos Encontrados
Parâmetros Biofísicos	NDVI, SAVI, EVI, NDWI, Albedo, Temperatura da Superfície, Emissividade, Saldo de Radiação, Evapotranspiração Real e Produtividade Primária Bruta
Produtos MODIS	MOD13, MYD13, MOD09, MOD11, MCD15, MCD43, MCDB3, MOD16 e MOD17
Estatística	Análise de Tendência Temporal (Regressão Linear e Teste de Mann Kendall) e Análise de Estatística Descritiva (Medidas de Tendência Central, Medidas de Dispersão); e Histogramas dos Pixels
Escala de Estudo	Bacia Hidrográfica, Microrregião, Mesorregião, Estado e Regional

Elaboração: Os autores (2022).

3 CONCLUSÃO

Nesta revisão bibliométrica e de literatura, aborda-se as principais características do sensor MODIS e seus produtos e várias aplicações dos parâmetros biofísicos obtidos a partir dos produtos MODIS para o ambiente semiárido e os métodos de detecção das formas de uso e cobertura da terra, relevantes para apoio ao monitoramento ambiental.

Para análise da cobertura da terra na região semiárida, destaca-se os produtos MOD13, MYD13, MOD09, MOD11, MCD15, MCD43, MCDB3, MOD16 e MOD17, que podem gerar índices espectrais utilizados na análise dos parâmetros biofísicos em regiões semiáridas. Destes índices espectrais, se sobressaem o NDVI, SAVI, EVI, NDWI, Albedo, Temperatura da Superfície, Evapotranspiração Real e Produtividade Primária Bruta. Por fim, para analisar as mudanças ocorridas em uma região, alguns estudos priorizam o uso de uma estatística descritiva da imagem.

Os produtos do MODIS continuam apresentando vieses na estimativa dos parâmetros em razão das contaminações por fatores atmosféricos, seja por vapores de água, aerossóis e nuvens. Portanto, os estudos que buscam verificar os impactos das mudanças climáticas necessitam ser cautelosos nas análises dos resultados obtidos.

As perspectivas das futuras aplicações deverão considerar o uso de análise de tendências temporais a uma coleção de produtos do sensoriamento remoto, como do sensor MODIS. Entre as técnicas mais utilizadas, se destacam o teste de tendência de Mann-Kendall e regressão linear entre parâmetros biofísicos com o tempo.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco (PGEA/UFRPE) e a Unidade Acadêmica de Serra Talhada da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UAST/UFRPE) pelo apoio institucional durante a realização da pesquisa.

Contribuição dos Autores

Ao 1º Autor (Alan César Bezerra) coube a responsabilidade das etapas de Conceptualização, Curadoria dos dados, Administração, Metodologia, Visualização, Redação-Minuta Inicial e Redação – Revisão e edição. O 2º autor (Geber Barbosa de Albuquerque Moura) foi responsável pela orientação e as etapas de Conceptualização, Metodologia, Supervisão e Redação – Minuta Inicial. O 3º Autor (Fabrício Marcos Oliveira Lopes), 4º Autor (Eberson Pessoa Ribeiro) e 5ª Autora (Josiclêda Domiciano Galvínci) foram responsáveis pelas etapas de Conceptualização, Supervisão e Redação – minuta inicial. Ao 6º Autor (Edimir Xavier Leal) coube a responsabilidade das etapas da Redação – Minuta inicial e Redação – Revisão e edição.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflito de interesse.

Referências

- ALVALÁ, R.; CUNHA, A. P.; BRITO, S. S.; SELUCHI, M. E.; MARENGO, J. A.; MORAES, O. L.; CARVALHO, M. A. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 91, Supl. 1, e20170209, 2019.
- ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V. DE; SANTOS, C. A. C. DOS; SANTOS, F. A. C. Comportamento Sazonal do Albedo e dos Índices de Vegetação na Bacia Hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 5, p. 1015-1027, 2014.
- ARAÚJO, A. L.; SILVA, M. T.; SILVA, B. B. DA; ANTONIO COSTA DOS SANTOS, C.; DANTAS, M. P. Análise das Mudanças de Parâmetros Biofísicos Sobre o Nordeste Brasileiro de 2002 a 2011 com Dados Modis Analysis of Biophysical Parameters Changes Over Northeastern Brazil From 2002 to 2011 With Modis Data. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 4, p. 589–599, 2018.
- ARCHIBALD, S.; SCHOLLES, R. J. Leaf green-up in a semi-arid African savanna - separating tree and grass responses to environmental cues. **Journal of vegetation science**, v. 18, n. 4, p. 583–594, 2007.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 1 nov. 2017.
- ARTAXO, P. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 34, n. 100, p. 53–66, 11 nov. 2020.
- ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E. T.; HATFIELD, J. L. Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat. **Agronomy Journal**, v. 76, n. 2, p. 300–306, 1 mar. 1984.
- BORGES, E. F.; SANO, E. E. Caracterização fenológica da cobertura vegetal do oeste da Bahia a partir de séries temporais de EVI do sensor modis. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 6, p. 1265–1280, 2014.
- CHENG, Y. B.; USTIN, S. L.; RIANO, D.; VANDERBILT, V. C. Water content estimation from hyperspectral images and MODIS indexes in Southeastern Arizona. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 2, p. 363–374, 2008.
- CUNHA, A. P. M.; ALVALÁ, R. C.; NOBRE, C. A.; CARVALHO, M. A. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 214–215, p. 494–505, 2015.
- DIDAN, K.; BARRETO MUNOZ, A. **MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series)**. Version 3.1; University of Arizona: Tucson, AZ, USA, 2019. Disponível em: <<https://vip.arizona.edu>>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- DORIGO, W. A.; ZURITA-MILLA, R.; DE WIT, A. J.; BRAZILE, J.; SINGH, R.; SCHAEPMAN, M. E. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, v. 9, n. 2, p. 165–193, 2007.
- EASTMAN, J. R.; SANGERMANO, F.; GHIMIRE, B.; ZHU, H.; CHEN, H.; NEETI, N.; CAI, Y.; MACHADO, E. A.; CREMA, S. C. Seasonal trend analysis of image time series. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 10, p. 2721–2726, 2009.
- ECKERT, S.; HÜSLER, F.; LINIGER, H.; HODEL, E. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia. **Journal of Arid Environments**, v. 113, p. 16–28, 2015.
- FENSHOLT, R. Earth observation of vegetation status in the Sahelian and Sudanian West Africa: comparison of terra MODIS and NOAA AVHRR satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 9, p. 1641–1659, 2004.
- FENSHOLT, R.; SANDHOLT, I.; RASMUSSEN, M. S. Evaluation of MODIS LAI, FAPAR and the relation

- between FAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n. 3–4, p. 490–507, 2004.
- FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, M. E. Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado-da-arte. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, vol. 30, núm. 4, pp. 379-390, 2008.
- GAO, B. C. A Normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sens. Environ**, v. 7212, n. apr. 1995, p. 257–266, 1996.
- GARCÍA-MORA, T. J.; MAS, J. F.; HINKLEY, E. A. Land cover mapping applications with MODIS: a literature review. **International Journal of Digital Earth**, v. 5, n. 1, p. 63–87, jan. 2012.
- GEBREMICHAEL, M.; BARROS, A. P. Evaluation of MODIS gross primary productivity (GPP) in tropical monsoon regions. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, n. 2, p. 150–166, jan. 2006.
- GOLDBLATT, R.; BALLESTEROS, A. R.; BURNEY, J. High Spatial Resolution Visual Band Imagery Outperforms Medium Resolution Spectral Imagery for Ecosystem Assessment in the Semi-Arid Brazilian Sertão. **Remote Sensing**, v. 9, n. 12, p. 1336, 2017.
- GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18–27, 2017.
- HAASHEMI, S.; WENG, Q.; DARVISHI, A.; ALAVIPANAH, S. K. Seasonal Variations of the Surface Urban Heat Island in a Semi-Arid City. **Remote Sensing**, v. 8, n. 4, 2016.
- HOUSPANOSSIAN, J.; GIMÉNEZ, R.; JOBBÁGY, E.; NOSETTO, M. Surface albedo raise in the South American Chaco: Combined effects of deforestation and agricultural changes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, p. 118–127, 2017.
- HU, G.; JIA, L. Monitoring of Evapotranspiration in a Semi-Arid Inland River Basin by Combining Microwave and Optical Remote Sensing Observations. **Remote Sensing**, v. 7, n. 3, p. 3056–3087, mar. 2015.
- HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195–213, 2002.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295–309, 1988.
- INDIRABAI, I.; NAIR, M. H.; NAIR, J. R.; NIDAMANURI, R. R. Optical Remote Sensing for Biophysical Characterisation in Forests: A Review. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 14, n. 2, p. 344-354, 2019.
- JOHN, R.; CHEN, J.; LU, N.; GUO, K.; LIANG, C.; WEI, Y.; NOORMETS, A.; MA, K.; HAN, X. Predicting plant diversity based on remote sensing products in the semi-arid region of Inner Mongolia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 5, p. 2018–2032, 2008.
- JUSTICE, C. O. VERMOTE, E., TOWNSHEND, JR, DEFRIES, R., ROY, DP, HALL, D.K., ... & BARNESLEY, M. J. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228–1249, 1998.
- JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, D. P.; MORISSETTE, J. T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1–2, p. 3–15, 1 nov. 2002.
- KALACSKA, M.; LUCANUS, O.; SOUSA, L.; ARROYO-MORA, J. P. A New Multi-Temporal Forest Cover Classification for the Xingu River Basin, Brazil. **Data**, Vol. 4, Page 114, v. 4, n. 3, p. 114, 1 ago. 2019.
- LIANG, S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 2, p. 213–238, 2001.
- MATOS, R. C. DE M.; CANDEIAS, A. L. B.; TAVARES JUNIOR, J. R. MAPEAMENTO DA

- VEGETAÇÃO, TEMPERATURA E ALBEDO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PAJEÚ COM IMAGENS MODIS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 1, p. 139–160, 2013.
- MIRANDA, R.Q.; NÓBREGA, R. L. B.; DE MOURA, M. S. B.; RAGHAVAN, S.; GALVÍNIO, J. D. Realistic and simplified models of plant and leaf area indices for a seasonally dry tropical forest. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 85, p. 101992, 2020.
- MONTEITH, J. L. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. **The Journal of Applied Ecology**, v. 9, n. 3, p. 747, 1972.
- MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 1781–1800, 2011.
- NANZAD, L.; ZHANG, J.; TUVENDORJ, B.; NABIL, M.; ZHANG, S.; BAI, Y. NDVI anomaly for drought monitoring and its correlation with climate factors over Mongolia from 2000 to 2016. **Journal of Arid Environments**, v. 164, p. 69–77, 2019.
- NERY, C. V. M.; MOREIRA, A. A.; FERNANDES, F. H. S.; ALMEIDA, R. P. Uso do Sensoriamento Remoto na Detecção de Mudança na Microrregião de Montes Claros/MG. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 1, p. 130–145, 2014.
- NOVO, E. M. de M. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. 4. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2010. 387 p.
- OLIVEIRA, L. M. M. DE; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B. DA; ANTONINO, A. C. D.; MOURA, A. E. S. S. DE. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS TT - Real evapotranspiration in catchment area of northeastern Brazil through the SEBAL and MODIS products. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 1039–1046, 2014.
- ORIMOLOYE, I. R.; BELLE, J. A.; OLOLADE, O. O. Drought disaster monitoring using MODIS derived index for drought years: A space-based information for ecosystems and environmental conservation. **Journal of Environmental Management**, v. 284, p. 112028, 2021.
- PADOVANNI, N. G.; LOPES, E. R.; SOUZA, J. C. DE; MORAIS, M. C. M. DE; LOURENÇO, R. W. Análise espacial da temperatura e albedo de superfície na Bacia Hidrográfica do Rio Una – Ibiúna/São Paulo, a partir de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 5, p. 1832–1845, 2018.
- PARENTE, L.; FERREIRA, L. Assessing the Spatial and Occupation Dynamics of the Brazilian Pasturelands Based on the Automated Classification of MODIS Images from 2000 to 2016. **Remote Sensing 2018**, Vol. 10, Page 606, v. 10, n. 4, p. 606, 2018.
- PEREIRA, O. J. R.; FERREIRA, L. G.; PINTO, F.; BAUMGARTEN, L. Assessing Pasture Degradation in the Brazilian Cerrado Based on the Analysis of MODIS NDVI Time-Series. **Remote Sensing**, v. 10, n. 11, p. 1761, 2018.
- PEREIRA, V. R.; CARVALHO, M. M. DE; ROTONDARO, R. G. A bibliometric study on the evolution of Service Quality research. **Production**, v. 23, n. 2, p. 312–328, 2013.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2a Edição ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- RANKINE, C.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; GUZMÁN, J. A.; ESPIRITO-SANTO, M. M.; SHARP, I. Comparing et al. Comparing MODIS and near-surface vegetation indexes for monitoring tropical dry forest phenology along a successional gradient using optical phenology towers. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 10, p. 105007, 2017.
- RIBEIRO, E. P.; SILVA NÓBREGA, R.; OLIVEIRA, F. DE; FILHO, M.; BERGUE, E.; MOREIRA, M. Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças ambientais na bacia hidrográfica do rio Pajeú. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 32, n. 1, p. 221–246, 2015.
- ROBINOVE, C. J.; CHAVEZ, P. S.; GEHRING, D.; HOLMGREN, R. Arid land monitoring using Landsat

- albedo difference images. **Remote Sensing of Environment**, v. 11, n. C, p. 133–156, 1 jan. 1981.
- ROUSE, J.; HAAS, R.; SCHELL, J.; DEERING, D. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: THIRD EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, DC, USA. **Proceedings...** Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1973. p. 309–317.
- RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. **Sensor Modis e Suas Aplicações Ambientais no Brasil**. Editora Parêntese ed. [s.l: s.n.], 2007.
- SANTOS, C. A. C. DOS; COSTA, M. V. G.; SILVA, M. T.; SILVA, L. L. DA; SANTOS, F. A. C.; BEZERRA, B. G.; MEDEIROS, S. D. S. Obtenção de Parâmetros Ambientais na Região Semiárida da Paraíba por Dados MODIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 633–647, 2017.
- SANTOS SILVA, J. L. DO; PADOVEZE, C. L.; SILVA, J. E. A Produção acadêmica sobre Consórcio Intermunicipal de Saúde realizada no Brasil de 1990 a 2017: Uma Análise Bibliométrica. **Revista de psicologia**, v. 13, n. 46, p. 243–261, 2019.
- SCHAAF, C. B.; GAO, F.; STRAHLER, A. H.; LUCHT, W.; LI, X.; TSANG, T.; STRUGNELL, N. C.; ZHANG, Z.; JIN, Y.; MULLER, J. P.; LEWIS, P.; BARNSLEY, M. HOBSON, P.; DISNEY, M.; ROBERTS, G.; DUNDERDALE, M.; DOLL, C.; D'ENTREMONT, R. P; HU, B.; LIANG, S.; PRIVETTE, J. L.; ROY, D. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1–2, p. 135–148, 2002.
- SCHUCKNECHT, A.; ERASMI, S.; NIEMEYER, I.; MATSCHULLAT, J. Assessing vegetation variability and trends in north-eastern Brazil using AVHRR and MODIS NDVI time series. **European Journal of Remote Sensing**, v. 46, n. 1, p. 40–59, 2013.
- SILVA, J. L. B. DA; MOURA, G. B. DE A.; SILVA, Ê. F. DE F.; LOPES, P. M. O.; SILVA, T. T. F. DA; LINS, F. A. C.; OLIVEIRA SILVA, D. A. DE; ORTIZ, P. F. S. Spatial-temporal dynamics of the Caatinga vegetation cover by remote sensing in municipality of the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 4, p. e7128, 2019.
- STEFANOV, W. L.; NETZBAND, M. Assessment of ASTER land cover and MODIS NDVI data at multiple scales for ecological characterization of an arid urban center. **Remote Sensing of Environment**, v. 99, n. 1–2, p. 31–43, 2005.
- TANG, X.; MA, M.; DING, Z.; XU, X.; YAO, L.; HUANG, X.; GU, Q.; SONG, L. Remotely Monitoring Ecosystem Water Use Efficiency of Grassland and Cropland in China's Arid and Semi-Arid Regions with MODIS Data. **Remote Sensing**, v. 9, n. 6, 2017.
- TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R. At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, n. 2, p. 51–63, 2008.
- TAVARES, V. C.; ARRUDA, Í. R. P. DE; SILVA, D. G. DA. Desertificação, mudanças climáticas e secas no semiárido brasileiro: uma revisão bibliográfica. **Geosul**, v. 34, n. 70, p. 385–405, 2019.
- TOMASELLA, J.; SILVA PINTO VIEIRA, R. M.; BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D. A.; OLIVEIRA SANTANA, M. DE; SESTINI, M. F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, n. jun, p. 197–206, 2018.
- TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127–150, 1979.
- VIEIRA, V. A. G. M.; RAMOS, A. W. P.; TIEPPO, R. C. Análise temporal da dinâmica da paisagem do município de Denise-Mato Grosso, Brasil. **Revista Cerrados**, v. 19, n. 01, p. 160–180, 2021.
- WU, X.; NAEGELI, K.; PREMIER, V.; MARIN, C.; MA, D.; WANG, J.; WUNDERLE, S. Evaluation of snow extent time series derived from Advanced Very High Resolution Radiometer global area coverage data (1982-2018) in the Hindu Kush Himalayas. **Cryosphere**, v. 15, n. 9, p. 4261–4279, 2021.

- YANG, P.; SHIBASAKI, R.; WU, W.; ZHOU, Q.; CHEN, Z.; ZHA, Y.; SHI, Y.; TANG, H. Evaluation of MODIS land cover and LAI products in cropland of North China plain using in situ measurements and landsat TM images. **IEEE transactions on geoscience and remote sensing**, v. 45, n. 10, p. 3087–3097, 2007.
- ZHANG, J.; OKIN, G. S.; ZHOU, B. Assimilating optical satellite remote sensing images and field data to predict surface indicators in the Western U.S.: Assessing error in satellite predictions based on large geographical datasets with the use of machine learning. **Remote Sensing of Environment**, v. 233, 2019.
- ZHAO, M.; HEINSCH, F. A.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. **Remote Sensing of Environment**, v. 95, n. 2, p. 164–176, 2005.
- ZOUNGRANA, B. J. B.; CONRAD, C.; THIEL, M.; AMEKUDZI, L. K.; DA, E. D. MODIS NDVI trends and fractional land cover change for improved assessments of vegetation degradation in Burkina Faso, West Africa. **Journal of Arid Environments**, v. 153, p. 66–75, 2018.

Biografia do autor principal



Alan César Bezerra nasceu em Recife-PE, em 1989. Cursou Engenharia Agrícola e Ambiental (2007-2011), com mestrado (2012-2014) e doutorado (2017-2020) em Engenharia Agrícola na Universidade Federal Rural de Pernambuco em Recife-PE. Atualmente, é docente da UFRPE, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, atuando no segmento de geotecnologias e com atuação especial em cartografia, geoprocessamento e sensoriamento remoto no monitoramento ambiental, produção agropecuária e extensão rural.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.