ReGeo ISSN: 2177-3246

METODOLOGIAS E TÉCNICAS APLICADAS AO ESTUDO DA DINÂMICA DO CO_2 E DO CARBONO DO SOLO EM DIFERENTES USOS E COBERTURAS DA TERRA: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA (1995–2020)

METHODS AND TECHNIQUES APPLIED TO THE STUDY OF CO_2 AND SOIL CARBON DYNAMICS UNDER DIFFERENT LAND USES AND LAND COVERS: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS (1995–2020)

METODOLOGÍAS Y TÉCNICAS APLICADAS AL ESTUDIO DE LA DINÁMICA DEL CO_2 Y DEL CARBONO DEL SUELO EN DIFERENTES USOS Y COBERTURAS DE LA TIERRA: UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO (1995–2020)

https://doi.org/10.56238/revgeov17n11-145

Data de submissão: 25/10/2026 **Data de publicação:** 25/11/2026

Valdinéia Gusmão Silva
Mestra em Ciências Ambientais
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: neiagusmaogeo@gmail.com

Jocimara Souza Britto Lobão
Doutora em Geografia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: juci.lobao@uefs.br

Higo Batista Ferreira
Doutorando em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: higoferreira8@gmail.com

Bruna Suellen Oliveira Mota
Mestra em Ciências Ambientais
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: bsomota@uefs.br

Washington de Jesus Sant'Anna da Franca Rocha
Doutor em Geologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: wrocha@uefs.br

Rodrigo Nogueira de Vasconcelos
Doutor em Ecologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: rnv@uefs.br

Deorgia Tayane Mendes de Souza
Doutora em Geociências Aplicadas e Geodinâmica
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: dtmsouza@uefs.br

RESUMO
O carbono orgânico do solo (COS) é o maior reservatório terrestre de carbono, e sua dinâmica é fortemente condicionada pelo uso e cobertura da terra; faltavam, contudo, sínteses sobre quais métodos, sensores e regiões concentram a produção científica que relaciona carbono do solo, CO_2 e uso e cobertura da terra. Este trabalho realizou uma análise bibliométrica dos artigos indexados na base Scopus até 2020: dos 198 documentos recuperados, 86 foram retidos após a triagem de títulos e resumos; redes de coautoria entre países e de coocorrência de palavras-chave foram construídas no VOSviewer, estatísticas descritivas foram obtidas no bibliometrix/R e os 26 artigos mais citados (76,4% das citações) foram lidos integralmente. As publicações cresceram à taxa anual de 7,97%, com 72% dos artigos em 2010–2020; Catena e Geoderma foram os periódicos mais produtivos, e China e Estados Unidos, os países de maior contribuição. Os temas evoluíram de modelos de produção primária, nos anos 1990, para estoque e sequestro de carbono em diferentes coberturas da terra, nos anos 2010. Nos artigos mais citados predominaram os sensores Landsat (34,6%) e MODIS (23,1%), os índices de vegetação (NDVI, EVI, LAI), os modelos de eficiência do uso da luz e de simulação (CASA, CENTURY) e o aprendizado de máquina (Random Forest, Cubist); nenhum utilizou o Google Earth Engine nem foi conduzido no semiárido brasileiro. Os resultados delimitam lacunas metodológicas (processamento em nuvem) e territoriais (regiões secas, como a Caatinga), ressalvadas as limitações de cobertura da base, de viés de idioma e de janela temporal inerentes à bibliometria.

Palavras-chave: Análise Bibliométrica. Carbono Orgânico do Solo. Sensoriamento Remoto. Uso e Cobertura da Terra. Google Earth Engine.

ABSTRACT
Soil organic carbon (SOC) is the largest terrestrial carbon pool, and its dynamics are strongly conditioned by land use and land cover; however, syntheses on which methods, sensors and regions concentrate the scientific production linking soil carbon, CO_2 and land use and land cover were lacking. This study carried out a bibliometric analysis of the articles indexed in the Scopus database up to 2020: of the 198 documents retrieved, 86 were retained after screening titles and abstracts; country co-authorship and keyword co-occurrence networks were built in VOSviewer, descriptive statistics were obtained with bibliometrix/R, and the 26 most cited articles (76.4% of citations) were read in full. Publications grew at an annual rate of 7.97%, with 72% of the articles in 2010–2020; Catena and Geoderma were the most productive journals, and China and the United States the countries with the largest contribution. Topics evolved from primary production models, in the 1990s, to carbon stocks and sequestration under different land covers, in the 2010s. Among the most cited articles, Landsat (34.6%) and MODIS (23.1%) sensors, vegetation indices (NDVI, EVI, LAI), light-use-efficiency and simulation models (CASA, CENTURY) and machine learning (Random Forest, Cubist) predominated; none used Google Earth Engine or was conducted in the Brazilian semi-arid region. The results delimit methodological (cloud processing) and territorial gaps (drylands such as the Caatinga), subject to the limitations of database coverage, language bias and temporal window inherent to bibliometrics.

Keywords: Bibliometric Analysis. Soil Organic Carbon. Remote Sensing. Land Use and Land Cover. Google Earth Engine.

RESUMEN
El carbono orgánico del suelo (COS) es el mayor reservorio terrestre de carbono, y su dinámica está fuertemente condicionada por el uso y la cobertura de la tierra; sin embargo, faltaban síntesis sobre qué métodos, sensores y regiones concentran la producción científica que relaciona carbono del suelo, CO_2 y uso y cobertura de la tierra. Este trabajo realizó un análisis bibliométrico de los artículos

indexados en la base Scopus hasta 2020: de los 198 documentos recuperados, 86 fueron retenidos tras la revisión de títulos y resúmenes; se construyeron en VOSviewer redes de coautoría entre países y de coocurrencia de palabras clave, se obtuvieron estadísticas descriptivas con bibliometrix/R y los 26 artículos más citados (76,4% de las citas) fueron leídos íntegramente. Las publicaciones crecieron a una tasa anual del 7,97%, con el 72% de los artículos en 2010–2020; Catena y Geoderma fueron las revistas más productivas, y China y Estados Unidos, los países de mayor contribución. Los temas evolucionaron desde modelos de producción primaria, en los años 1990, hacia el almacenamiento y secuestro de carbono en distintas coberturas de la tierra, en los años 2010. En los artículos más citados predominaron los sensores Landsat (34,6%) y MODIS (23,1%), los índices de vegetación (NDVI, EVI, LAI), los modelos de eficiencia en el uso de la luz y de simulación (CASA, CENTURY) y el aprendizaje automático (Random Forest, Cubist); ninguno utilizó Google Earth Engine ni se realizó en el semiárido brasileño. Los resultados delimitan vacíos metodológicos (procesamiento en la nube) y territoriales (regiones secas, como la Caatinga), con las limitaciones de cobertura de la base, de sesgo idiomático y de ventana temporal inherentes a la bibliometría.

Palabras clave: Análisis Bibliométrico. Carbono Orgánico del Suelo. Teledetección. Uso y Cobertura de la Tierra. Google Earth Engine.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a relevância do carbono orgânico do solo já é globalmente difundida, este desempenha um importante papel na regulação das mudanças climáticas, seja por meio da liberação do Carbono (C) ou enquanto sumidouro do mesmo (Trumbore; Camargo, 2009). O reservatório de carbono do solo supera, em magnitude, o carbono armazenado na vegetação e na atmosfera somados, de modo que pequenas variações relativas nos estoques de COS têm efeito expressivo sobre o balanço global de carbono (Lal, 2004). Os solos são fornecedores de importantes serviços ecossistêmicos como a produção de alimentos e disponibilidade de água, porém com aumento das demandas da população surge também uma constante e crescente pressão sobre ele (Milne *et al.*, 2015; Silva, 2020).

O carbono orgânico do solo é um importante indicador de fertilidade (Wang *et al.*, 2018a, 2018b) e é convencionalmente estimado como cerca de 58% da matéria orgânica (MO) do solo, fator que, embora amplamente adotado, varia entre solos e tende a superestimar a MO (Pribyl, 2010). Seus teores estão diretamente relacionados aos tipos de manejo, uso e cobertura da terra, que atuam fortemente na modificação das taxas de acúmulo e decomposição da MO: a conversão de florestas e pastagens em cultivos reduz substancialmente os estoques de COS (Guo; Gifford, 2002; Don; Schumacher; Freibauer, 2011).

O reconhecimento da necessidade de implantação de práticas que maximizam o aumento do armazenamento de C nos solos é algo posto e compreendido como um caminho crucial para amenizar os crescentes níveis de emissão de CO_2 para a atmosfera e assim auxiliar na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas ocasionadas pela interferência do homem (Lal *et al.*, 2007; Smith, 2012; IPCC, 2022). O carbono do solo responde por cerca de um quarto do potencial de mitigação das soluções climáticas naturais (Bossio *et al.*, 2020), e metas como a “4 por mil” dependem de sistemas robustos de medição e monitoramento (Minasny *et al.*, 2017).

Por meio das técnicas de mapeamento com Sensoriamento Remoto (SR), é possível estabelecer cronologias espaciais da vegetação, gerar modelos de quantificação de biomassa ou ainda detecção de alterações na vegetação, possibilitando uma análise da degradação vegetal e dos impactos ambientais gerados (Lima Júnior *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2019). As técnicas do Sensoriamento Remoto surgem então como um importante arcabouço para os estudos voltados à compreensão de padrões espaciais de fluxo de carbono, o que torna possível a mensuração do sequestro de carbono em compartimentos, como o solo, de forma a auxiliar no desenvolvimento de práticas eficazes na mitigação do CO_2 da atmosfera. Os avanços do SR aplicado ao ciclo do carbono foram dos índices de vegetação e modelos de eficiência do uso da luz ao aprendizado de máquina (Xiao *et al.*, 2019), e a abertura do acervo

Landsat, em 2008, e as plataformas em nuvem, como o Google Earth Engine (GEE), ampliaram a escala das análises (Wulder *et al.*, 2012; Gorelick *et al.*, 2017).

O Protocolo de Kyoto, acordo firmado entre os países integrantes da Organização das Nações Unidas, estabeleceu algumas medidas que precisam ser adotadas tendo como meta a redução da emissão dos Gases do Efeito Estufa (GEE), como: a proteção e aumento de sumidouros e reservatórios de GEE sobre o meio ambiente e promoção de pesquisas e tecnologias ligadas ao sequestro de dióxido carbono (UNFCCC, 1998). Visando o cumprimento das metas estabelecidas entres os países, eles passaram a investir em estudos voltados à diminuição e mitigação do CO_2.

Embora as técnicas de SR sejam amplamente utilizadas nos estudos voltados à compreensão da dinâmica do gás carbônico desde a década de 1990 (Sellers *et al.*, 1995; Feng *et al.*, 2007; Grinand *et al.*, 2017; Gomes *et al.*, 2019), a realização de uma análise dos estudos já desenvolvidos é relevante, uma vez que esta possibilita compreender padrões e lacunas de desenvolvimento desta área de pesquisa. Além disso, é possível identificar tendências temáticas, metodológicas e conceituais, considerando a sua variação no tempo, de forma a contribuir em áreas da ciência ainda em desenvolvimento ou já consolidados (Zhang *et al.*, 2017). As revisões disponíveis concentram-se em aspectos específicos — estimativa de COS por espectroscopia e imagens de satélite (Angelopoulou *et al.*, 2019; Vaudour *et al.*, 2022), mapeamento digital de solos (Wadoux; Minasny; McBratney, 2020) ou aplicações do GEE (Tamiminia *et al.*, 2020) — e não há, até onde se sabe, um mapeamento quantitativo que articule carbono do solo, fluxos de CO_2, uso e cobertura da terra e técnicas de SR, nem uma avaliação das regiões contempladas por esses estudos.

Os pesquisadores vêm utilizando a bibliometria, que tem por base a utilização de ferramentas matemáticas e estatísticas para analisar publicações, citações e periódicos em diferentes campos de estudo (Vasconcelos *et al.*, 2020), e que, combinada à leitura sistemática dos trabalhos mais influentes, permite identificar não apenas quem publica e onde, mas também quais dados, sensores e métodos sustentam o conhecimento acumulado (Donthu *et al.*, 2021). O estudo da relação do carbono no solo está diretamente relacionado com os tipos de uso e cobertura da terra, tema que tem ganhado ênfase nas últimas décadas na comunidade científica, tendo em vista a necessidade de compreender metodologias e técnicas que identifiquem a dinâmica do carbono e o seu processo em diferentes níveis nos sistemas naturais, tais como solo e biomassa.

Diante deste contexto, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar a produção científica indexada na base Scopus, entre 1995 e 2020, no que tange aos métodos e técnicas aplicados à identificação da dinâmica do CO_2 e do carbono do solo em diferentes usos e coberturas da terra, de modo a caracterizar tendências, atores, temas e lacunas metodológicas e territoriais desse campo de

pesquisa. Para alcançar o objetivo pretendido, algumas questões foram levantadas: quais as tendências de publicações? Quais os países e revistas mais relevantes? Quais os autores e trabalhos mais citados? Qual o foco de pesquisa em diferentes períodos? Quais os sensores e metodologias mais utilizadas? Quais são as áreas onde estes estudos são desenvolvidos? Essas questões foram traduzidas nos seguintes objetivos específicos:

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) caracterizar a evolução temporal da produção científica sobre o tema entre 1995 e 2020, suas áreas temáticas e os periódicos mais representativos;
b) identificar os países, as instituições e os autores mais produtivos e mais citados, bem como as redes de colaboração entre países;
c) analisar a evolução dos focos de pesquisa por meio das redes de coocorrência de palavras-chave, por década e para todo o período;
d) identificar, nos artigos mais citados, os sensores, as abordagens metodológicas e as áreas de estudo predominantes, de forma a apontar lacunas metodológicas e territoriais para pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CARBONO DO SOLO, USO E COBERTURA DA TERRA E SENSORIAMENTO REMOTO

A dinâmica do carbono do solo resulta do balanço entre a entrada de resíduos vegetais e a perda por decomposição e erosão, processos alterados pela substituição da vegetação nativa por sistemas agrícolas e pastoris. A síntese pioneira de Guo e Gifford (2002) indicou perdas médias de 42% do estoque de COS na conversão de floresta nativa em cultivos e de 59% na conversão de pastagem em cultivos, e Don, Schumacher e Freibauer (2011) estimaram, para os trópicos, perdas da ordem de 25% na conversão de floresta primária em lavouras, com recuperação parcial em florestas secundárias. Uma metanálise global recente confirma a mudança de uso da terra entre os principais vetores de perda de COS, com efeitos dependentes do clima, do solo e do tempo desde a conversão (Beillouin *et al.*, 2023).

O sensoriamento remoto contribui para a quantificação desses processos por duas vias complementares. A primeira é indireta: índices de vegetação derivados de sensores ópticos, como o NDVI, o EVI e o índice de área foliar (LAI), alimentam modelos de eficiência do uso da luz, de produção primária e de ciclagem do carbono — a exemplo dos modelos CASA, CENTURY e BEPS — que estimam as entradas de carbono no sistema solo-planta e, em combinação com dados de torres de fluxo por covariância de vórtices, os fluxos líquidos de CO_2 entre superfície e atmosfera (Xiao *et*

al., 2019; Baldocchi, 2020). A segunda é direta: a reflectância do solo exposto no visível e no infravermelho relaciona-se com o teor de COS, que pode ser estimado por espectroscopia de campo e laboratório (Viscarra Rossel *et al.*, 2016) e, com maior incerteza, por imagens orbitais de áreas com solo descoberto (Angelopoulou *et al.*, 2019; Vaudour *et al.*, 2022).

Ambas as vias convergem no mapeamento digital de solos, no qual covariáveis ambientais derivadas do SR, do relevo e do clima são relacionadas a observações de campo por algoritmos de aprendizado de máquina, como Random Forest e Cubist, para produzir mapas de COS com incerteza quantificada em escalas que vão da propriedade rural ao globo (Wadoux; Minasny; McBratney, 2020; Poggio *et al.*, 2021). O volume de dados exigido por essas abordagens impulsionou o uso de plataformas de computação em nuvem, como o Google Earth Engine, que reúne os acervos completos Landsat, MODIS e Sentinel e capacidade de processamento paralelo acessível por interface de programação (Gorelick *et al.*, 2017), e cujas aplicações cresceram aceleradamente após 2015 (Kumar; Mutanga, 2018; Amani *et al.*, 2020).

2.2 A BIBLIOMETRIA COMO FERRAMENTA DE MAPEAMENTO CIENTÍFICO

A realização de uma bibliometria consiste na aplicação de uma análise estatística para conhecer determinadas características de uso e construção de documentos científicos, tendo um caráter quantitativo e qualitativo (Spinak, 1996), o que, segundo Cobo *et al.* (2011), combina ferramentas de análise de desempenho e mapeamento de ciências para análise do campo de pesquisa. Portanto, a abordagem bibliométrica é uma ferramenta que permite analisar a evolução das pesquisas científicas com base na estrutura conceitual, intelectual e social (Zupic; Čater, 2015). A análise de desempenho descreve a produtividade e o impacto de autores, instituições, países e periódicos, enquanto o mapeamento científico — por meio de redes de coautoria, cocitação, acoplamento bibliográfico e coocorrência de palavras-chave — revela a estrutura e a evolução temática de um campo (Donthu *et al.*, 2021). Softwares de uso livre, como o VOSviewer (Van Eck; Waltman, 2010) e o pacote bibliometrix do ambiente R (Aria; Cuccurullo, 2017), tornaram essas análises acessíveis e reprodutíveis, e sua aplicação ao sensoriamento remoto tem permitido identificar a ascensão de novos atores, sensores e temas (Zhang *et al.*, 2017; Vasconcelos *et al.*, 2020).

Os resultados de uma análise bibliométrica, contudo, são condicionados pela base de dados e pelos critérios de busca adotados, pois as bases diferem em cobertura e sobrerrepresentam publicações em língua inglesa (Mongeon; Paul-Hus, 2016), e pelas contagens de citações, que dependem do tempo decorrido desde a publicação. Essas propriedades delimitam o alcance das inferências e são retomadas na seção 4.6.

3 METODOLOGIA

3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA E QUESTÕES NORTEADORAS

A pesquisa foi estruturada a partir das questões norteadoras apresentadas na Introdução, cada uma associada a um tipo de análise e a um conjunto de dados, conforme sintetizado no Quadro 1.

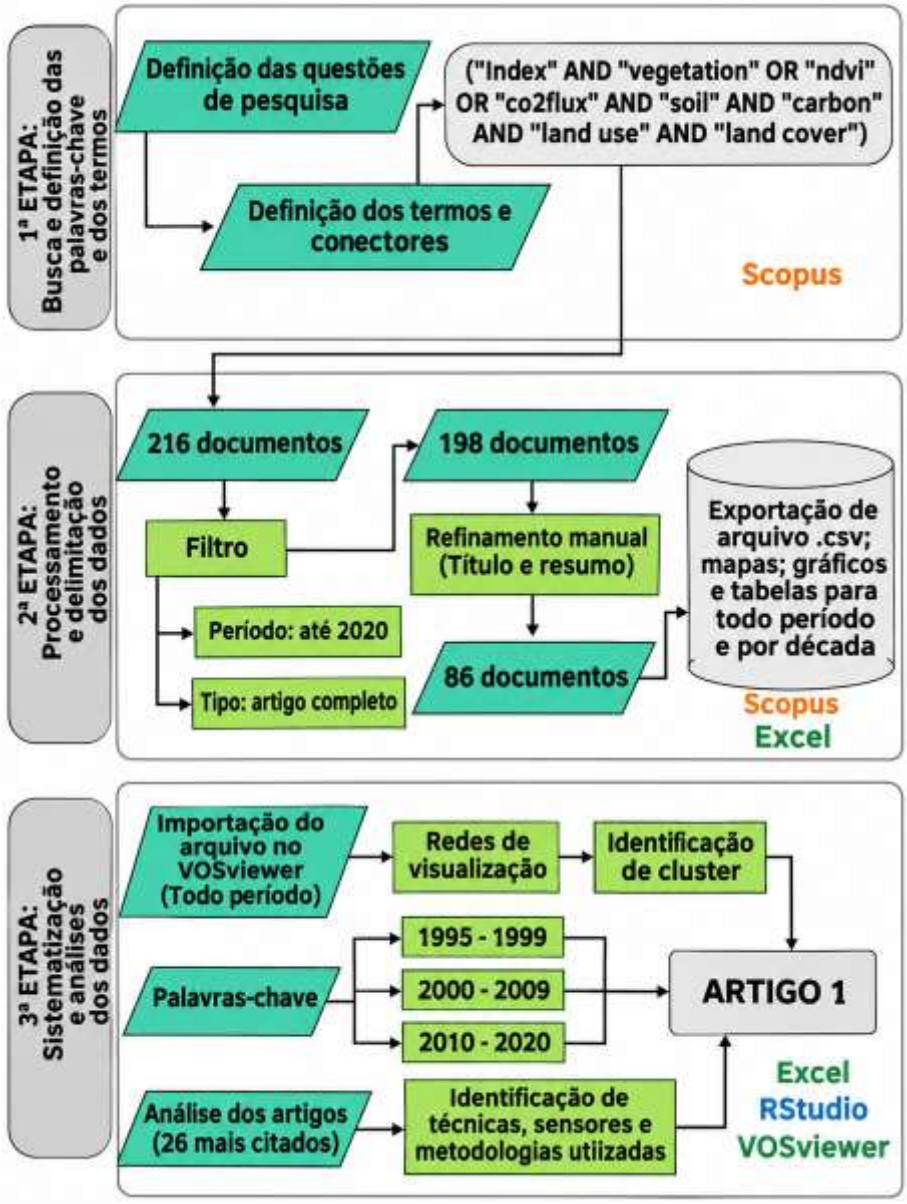
Quadro 1. Relação entre as questões levantadas, o tipo de análise e os dados utilizados.

Questões	Tipo de análise	Dados utilizados
Quais as tendências de publicações?	Estatísticas gerais; rede de coocorrência de palavras-chave; rede de coautoria	Todos os artigos
Quais os países que mais contribuíram nessa área de pesquisa?	Rede de coautoria entre países; estatísticas gerais	Todos os artigos
Quais as publicações mais citadas?	Rede de coocorrência; estatísticas gerais	Artigos mais citados
Quais as revistas mais relevantes nessa área de pesquisa?	Estatísticas gerais	Todos os artigos
Quais foram os autores que mais contribuíram com as pesquisas nessa área?	Rede de coautoria; estatísticas gerais	Todos os artigos
Qual o foco de pesquisa em diferentes períodos?	Rede de coocorrência de palavras-chave por década	Todos os artigos
Quais os sensores utilizados?	Leitura dos artigos	Artigos mais citados
Quais as metodologias utilizadas?	Leitura dos artigos	Artigos mais citados
Qual a área de estudo?	Leitura dos artigos	Artigos mais citados

Fonte: Elaborado pelos autores

Para responder a tais questões utilizaram-se os artigos de referência extraídos da base Scopus, para a elaboração de gráficos, quadros, redes de dados bibliográficos e redes de coocorrência de termos. A abordagem utilizada está dividida em três etapas (Figura 1): a primeira consiste na identificação dos termos e conectores mais relevantes, além da definição dos filtros aplicados na base de busca; a segunda compreende o processamento e a delimitação dos dados, com a leitura de todos os títulos e resumos dos artigos selecionados, de maneira a identificar e excluir os artigos que não tratavam da temática, e a exportação dos registros; a terceira corresponde à sistematização e análise dos dados, com a construção das redes para todo o período e por década e a leitura integral dos 30% de artigos mais citados.

Figura 1. Fluxograma metodológico da pesquisa, organizado em três etapas: (1) definição das questões, dos termos e dos conectores de busca na base Scopus; (2) processamento e delimitação dos dados (216 documentos recuperados, 198 após os filtros de período e tipo de documento e 86 após o refinamento manual por título e resumo); (3) sistematização e análise dos dados no VOSviewer, no R e em planilha eletrônica, com redes para todo o período e por década e leitura dos 26 artigos mais citados.



Fonte: Elaborado pelos autores

3.2 BASE DE DADOS, ESTRATÉGIA DE BUSCA E CRITÉRIOS DE ELEGIBILIDADE

A base de dados selecionada foi a Scopus, considerada o maior banco de dados de caráter multidisciplinar, contabilizando mais de 24.000 periódicos revisados por pares e mais de 5.000 editores e citações de diferentes países (Elsevier, 2021). Além disso, a base da Scopus possui uma gama de ferramentas que operam de forma eficaz para recuperar, agregar e exportar informações de dados em vários formatos, de maneira a possibilitar uma visão mais abrangente das pesquisas produzidas no

mundo nas áreas da ciência, tecnologia, medicina, ciências sociais, artes e humanidades (Vasconcelos *et al.*, 2020).

Com o objetivo de identificar os artigos que abordam a temática aqui discutida, realizaram-se algumas buscas preliminares na base Scopus, por meio da combinação de diferentes termos e conectores, para então encontrar aqueles que se mostraram mais relevantes para a presente pesquisa: *(index AND vegetation OR ndvi OR co2flux) AND (soil AND carbon) AND (land AND use) AND (land AND cover)*. Na primeira cláusula, pela ordem de precedência vigente na Scopus à época da busca, em que o operador OR é processado antes do AND (Elsevier, 2025), a expressão equivale a *index AND (vegetation OR ndvi OR co2flux)*; a ausência de parênteses internos nessa cláusula é registrada como limitação à reprodutibilidade e deve ser explicitada em replicações futuras.

A busca realizada foi feita por meio dos títulos, resumos e palavras-chave, limitou-se apenas a publicações de periódicos, reduzindo a possibilidade de inclusão de trabalhos duplicados, de forma a evitar a consideração de resultados falso-positivos. Foram considerados os trabalhos indexados a qualquer momento até o ano de 2020, do tipo artigo e de língua portuguesa, inglesa ou espanhola. Além disso, os trabalhos publicados em e/ou referentes a críticas, anais de congressos, livros e capítulos de livros foram descartados, uma vez que, estes podem conter estudos publicados em mais de um meio de divulgação. A busca inicial recuperou 216 documentos; a aplicação dos filtros de período e de tipo de documento reduziu o conjunto a 198 registros (Figura 1).

O conjunto de artigos obtidos, um total de 198 documentos, passou por um processo de triagem, onde realizou-se a leitura dos títulos, resumos e palavras-chave com o objetivo de identificar a ambivalência de palavras, o que resultou na delimitação de 86 artigos. Após esta etapa, selecionou-se uma amostra de 30% do conjunto de artigos mais citados, um total de 26 artigos. A partir dessa amostragem, foi realizada uma análise sistemática por meio da leitura desses documentos, buscando identificar quais foram as áreas de estudos, sensores, metodologias e técnicas utilizadas. As contagens de citações utilizadas para essa seleção correspondem aos valores registrados na Scopus no momento da extração dos dados.

3.3 CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DAS REDES BIBLIOMÉTRICAS

Com a base de dados selecionada elaboraram-se as redes para os dados bibliográficos. Foi utilizado o software VOSviewer, que foi desenvolvido para análises bibliométricas das produções científicas. O software utiliza o método de mapeamento VOS (*Visualization of Similarities*), que possibilita localizar e calcular os tópicos presentes em um mapa bidimensional de maneira que a distância entre dois ou mais itens represente a similaridade entre os mesmos, podendo ser conectados

por coautoria, coocorrência, citação, acoplamento bibliográfico ou links de cocitação (Waltman; Van Eck; Noyons, 2010; Van Eck; Waltman, 2010). A elaboração dos gráficos e das estatísticas descritivas foi realizada a partir do pacote bibliometrix do programa R (Aria; Cuccurullo, 2017) e do software Excel. As versões dos softwares não foram registradas pelos autores.

Na análise de coocorrência das palavras-chave foi aplicado um filtro manual para eliminar palavras irrelevantes, assim como a junção de termos que representam sinônimos ou abreviações, o *thesaurus* (Van Eck; Waltman, 2010); o mesmo procedimento foi utilizado para as análises de autores, organizações e países, a fim de evitar duplicação ou inclusão de resultados falsos. Para isso foi empregado o método de contagem binária, onde as repetições dos termos dentro dos documentos não são levadas em consideração, isto significa que mesmo que o termo apareça mais de uma vez no resumo, título ou palavras-chave, ele será contabilizado apenas uma vez (Waltman; Van Eck; Noyons, 2010).

Já nas análises dos autores e países considerou-se o número de artigos produzidos por autor ou país, onde estabeleceu-se um mínimo de três produções. O número de ocorrência de palavras-chave foi definido em sete vezes para título, resumo e palavras-chave, evitando nós com baixa frequência e conexões. Em relação às décadas que abrangem todo o período de estudo (1995-2020), a frequência de palavras foi definida em duas vezes para a década de 1990, quatro vezes para a década de 2000 e seis vezes para década seguinte, o ano de 2020 foi incluso na década de 2010 por possuir um único ano em sua década, o que não seria suficiente para representação.

As redes são representadas por um conjunto de nós e arestas, onde os nós representam os objetos de estudo, como as palavras-chave e países, e as arestas a conexão ou relação entre os objetos. A distância entre nós indica a proximidade da relação existente entre os termos, enquanto o tamanho dos nós é definido pelo peso que o termo representa em uma rede (Waltman; Van Eck; Noyons, 2010; Van Eck; Waltman, 2010). Nas visualizações do tipo sobreposição (*overlay*), a cor de cada nó representa o ano médio de publicação dos documentos em que o item ocorre, o que permite identificar termos e países cuja presença é mais antiga ou mais recente no conjunto analisado.

3.4 ANÁLISE DE CONTEÚDO DOS ARTIGOS MAIS CITADOS

Para os 26 artigos mais citados, a leitura integral orientou-se por uma ficha de extração com as seguintes variáveis: título, autores, periódico, ano, número de citações, sensores ou fontes de dados de sensoriamento remoto, abordagens metodológicas (modelos, índices, algoritmos e técnicas analíticas) e área de estudo, incluindo sua caracterização climática quando informada. Os artigos foram ainda classificados quanto ao foco principal de estudo em quatro categorias: estoque de carbono no solo;

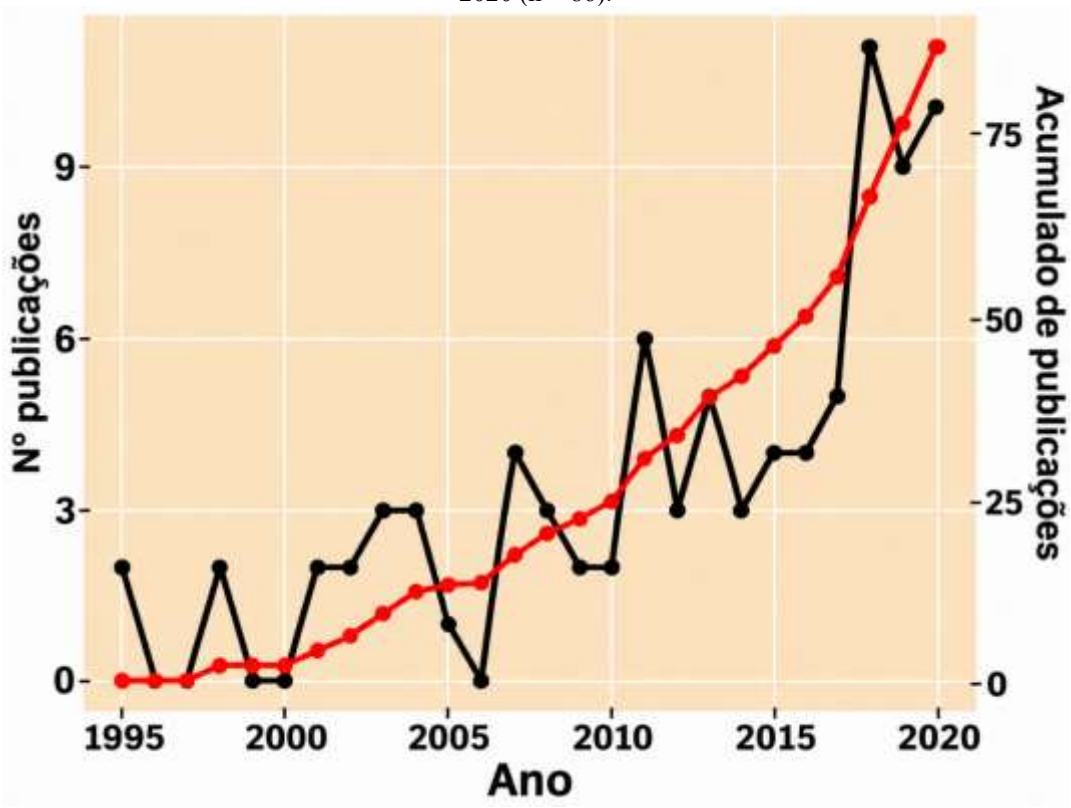
relação entre tipos de cobertura da terra e dinâmica terra-atmosfera; ciclo do carbono; e produção primária líquida. A síntese dessa extração é apresentada nos Quadros 2 e 3, e as frequências de sensores e de focos de estudo foram representadas graficamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EVOLUÇÃO TEMPORAL, ÁREAS TEMÁTICAS E PERIÓDICOS

Os 86 artigos recuperados foram publicados entre os anos de 1995 e 2020, tendo uma média de 3,3 documentos por ano. A curva de distribuição cumulativa da série temporal (Figura 2) indica crescimento aproximadamente exponencial da produção anual, com taxa anual de crescimento de 7,97% no período.

Figura 2. Número anual de publicações (linha preta, eixo esquerdo) e número acumulado de publicações (linha vermelha, eixo direito) sobre a dinâmica do carbono do solo e o uso e cobertura da terra indexadas na base Scopus entre 1995 e 2020 (n = 86).



Fonte: Elaborada pelos autores com dados da base Scopus.

Observa-se no gráfico de tendência da Figura 2 que o primeiro pico de publicações corresponde à década de 2000, no ano de 2003, com três artigos, o mesmo se apresentando para o ano de 2004. Houve um outro pico de produtividade, este já na década de 2010, em que foram publicados um total de seis artigos no ano de 2011, mas foi no ano de 2018 que as publicações ganharam maior destaque,

abrangendo um total de onze artigos publicados, patamar mantido em 2019 e 2020. Ao analisarmos a tendência de publicações por década, nota-se que no período de 1990, o número de trabalhos corresponde a 2,2% do total, tornando-se mais expressivo na década seguinte, com 22% dos artigos publicados, mas somente a partir da década de 2010, que inicia em 2010 até 2020, as publicações ganham mais notoriedade, o que representa um total de 72% das publicações.

A aceleração observada a partir de meados dos anos 2000 é coerente com dois processos concomitantes. O primeiro é institucional: a entrada em vigor do Protocolo de Kyoto, em 2005, e a consolidação dos inventários nacionais de emissões ampliaram a demanda por métodos de quantificação de estoques e fluxos de carbono em diferentes usos da terra (UNFCCC, 1998; IPCC, 2022). O segundo é tecnológico: a abertura gratuita do acervo Landsat, em 2008, multiplicou o uso de séries temporais de imagens em estudos ambientais (Wulder *et al.*, 2012), e a disseminação de produtos MODIS e de plataformas de processamento em nuvem reduziu o custo de análises regionais e globais (Gorelick *et al.*, 2017; Xiao *et al.*, 2019). Ressalta-se que a associação entre esses processos e o crescimento das publicações é uma interpretação plausível, e não uma relação causal testada neste estudo.

De acordo com os dados da base Scopus, as áreas de pesquisa mais relevantes para o tema da dinâmica do carbono e a relação com os tipos de uso e cobertura da terra são as Ciências da Terra e Planetária (28,8%), Ciências Agrárias e Biológicas (26,7%), Ciências Ambientais (24%) e as Ciências Sociais (4,1%) em menor proporção. Essa distribuição reflete o caráter interdisciplinar do tema e explica a dispersão das publicações entre periódicos.

Já em relação às fontes de publicação, foram identificados 55 periódicos, porém apenas cinco deles tinham três ou mais publicações. Com os dados obtidos, foi possível constatar que ao longo do tempo os periódicos Catena e Geoderma foram os mais representativos, pois ambos possuem o maior número de publicações, sete artigos cada. A Tabela 1 apresenta os 10 periódicos de maior destaque em relação ao número de publicações. Os dois periódicos líderes são dedicados à ciência do solo, e os três seguintes, ao sensoriamento remoto e às ciências atmosféricas, o que evidencia a dupla filiação do campo: o carbono do solo como objeto e o sensoriamento remoto como método.

Tabela 1. Periódicos com maior número de publicações sobre o tema indexadas na base Scopus (1995–2020).

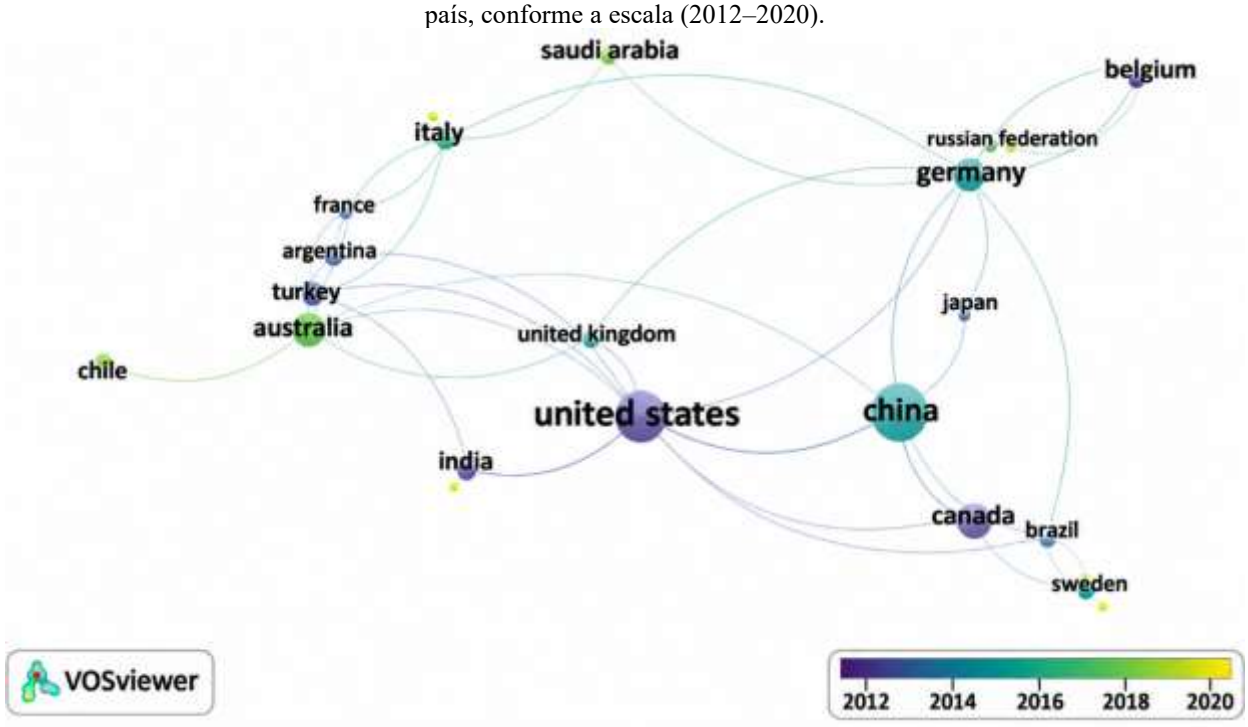
Periódico	Nº de publicações
Catena	7
Geoderma	7
Journal of Geophysical Research: Atmospheres	4
Remote Sensing of Environment	4
Remote Sensing	3
Biogeosciences	2
Chinese Geographical Science	2
Ecological Indicators	2
Ecological Modelling	2
Geoscientific*	2

Fonte: Elaborada pelos autores

4.2 PAÍSES, INSTITUIÇÕES E AUTORES

A partir da busca realizada foram identificados um total de 39 países que cooperaram entre si em pelo menos uma publicação, o que pode ser observado na rede de coautoria entre os países (Figura 3). Nota-se ainda uma grande disparidade entre o número de publicações de cada país, onde a China e os Estados Unidos ganham destaque em comparação aos demais, com 24 e 21 publicações, respectivamente (27,9% e 24,4% dos 86 artigos, considerando que um mesmo artigo pode ser contabilizado para mais de um país), o que é representado pelo tamanho dos nós que identificam estes países (Figura 3).

Figura 3. Rede de coautoria entre países nas publicações analisadas (1995–2020). Os círculos representam cada país e seu tamanho é correspondente ao número de publicações; as arestas que ligam cada círculo correspondem à intensidade com que ocorre a relação de cooperação entre esses países; as cores indicam o ano médio de publicação dos artigos de cada país, conforme a escala (2012–2020).



Fonte: Elaborada pelos autores com dados da base Scopus.

A escala de cores da Figura 3 permite situar os países no tempo. Estados Unidos, Canadá e Reino Unido apresentam ano médio de publicação mais antigo, o que indica que as primeiras publicações concentraram-se nesses países; China, Alemanha e Austrália apresentam ano médio intermediário a recente, assumindo um lugar de centralidade para as publicações no decorrer da década de 2010; e os países com menor número de artigos, como Brasil, Argentina, França, Itália e Espanha, aparecem com anos médios mais recentes. Cabe salientar que mesmo com o avanço de publicações por parte de países como a China, que vem se destacando como grande produtora do conhecimento no mundo, ainda é notória a relevância dos Estados Unidos enquanto potência produtora do conhecimento mundial. Uma outra questão bastante relevante a ser considerada é a rede de colaboração entre os países, onde a Alemanha estabelece o maior número de relações com os demais países, acompanhada pela China e pelos Estados Unidos, que também apresentam uma rede de colaboração ativa.

A ascensão chinesa observada aqui acompanha um padrão mais geral do sensoriamento remoto: entre 2010 e 2015, a China tornou-se o país com maior número de publicações na área, superando os Estados Unidos, com forte participação da Chinese Academy of Sciences (Zhang *et al.*, 2017). No conjunto analisado, a associação de *China* a *land degradation* e *grassland* nas redes de palavras-chave (seção 4.3) sugere que parte dessa produção trata de degradação e carbono do solo no norte semiárido do país.

No que se refere às afiliações dos autores, identificaram-se a partir dos dados 160 organizações, sendo que apenas seis possuíam quatro ou mais publicações (Tabela 2). O país com maior número de institutos classificados entre os dez que mais se destacam em relação ao número de publicações é os Estados Unidos, com cinco das dez organizações, seguido da China com três instituições; Austrália e Canadá apresentam apenas uma instituição cada. A Chinese Academy of Sciences, considerada a maior organização de pesquisa do mundo, que debruça seus estudos ao desenvolvimento da alta tecnologia ligada às Ciências naturais, foi a que mais publicou dentro do período de estudo (treze publicações), tendo uma considerável diferença em comparação com a segunda instituição, University of Toronto (seis publicações), e a terceira, University of Chinese Academy of Sciences (cinco publicações).

Tabela 2. Dez instituições com maior número de publicações sobre o tema no período de estudo (1995–2020).

Instituição	Nº de publicações	País
Chinese Academy of Sciences	13	China
University of Toronto	6	Canadá
University of Chinese Academy of Sciences	5	China
Ministry of Education China	4	China
NASA Goddard Space Flight Center	4	Estados Unidos
The University of Sydney	4	Austrália
NASA Ames Research Center	3	Estados Unidos
United States Geological Survey	3	Estados Unidos
University of Maryland, College Park	3	Estados Unidos
Carnegie Institution of Washington	3	Estados Unidos

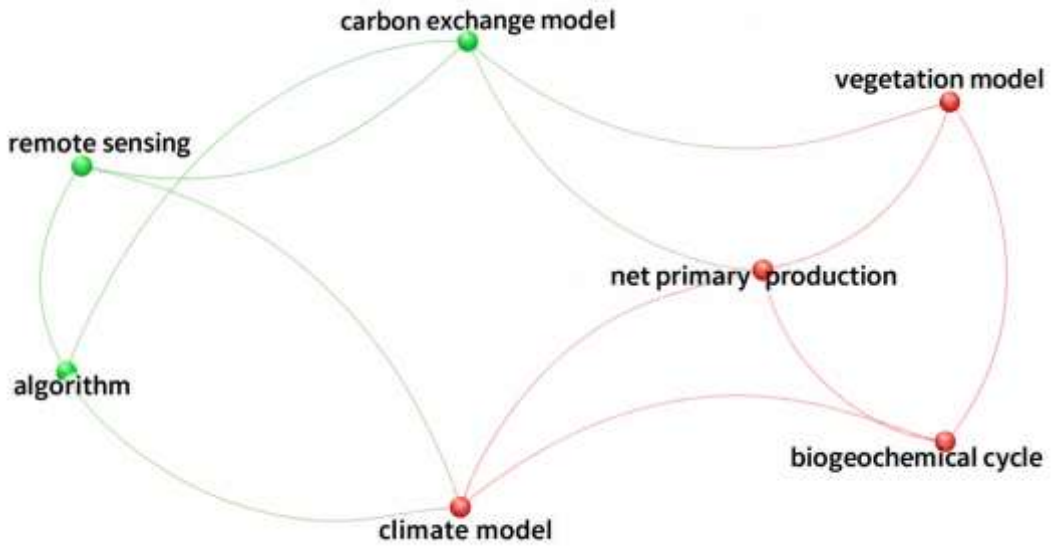
Fonte: Elaborada pelos autores com dados da base Scopus.

Quanto aos autores, os que mais publicaram foram Chen, J. M. e Liu, G., ambos com seis publicações; estes autores possuem filiação com as instituições mais representativas em relação ao número de trabalhos publicados (University of Toronto e Chinese Academy of Sciences, respectivamente). As linhas de pesquisa dos dois autores são voltadas para a aplicação do sensoriamento remoto e do Sistema de Informação Geográfica (SIG), porém Chen, J. M. tem seu interesse mais centralizado nos estudos ligados à modelagem dos ciclos biogeoquímicos e das mudanças climáticas, enquanto Liu, G. debruça-se mais precisamente ao entendimento e monitoramento das mudanças do uso e cobertura da terra e degradação da mesma. Entre os dez autores com maior número de publicações (Chen, J. M.; Liu, G.; Feng, X.; Liu, J.; Klooster, S., entre outros) e os dez com maior número de citações (Chen, J. M.; Hall, F. G.; Vesala, T.; Liu, S.; Liu, G., entre outros), a maioria é chinesa, e apenas Chen, J. M. figura no topo das duas listas, o que indica que as publicações mais relevantes (mais citadas/discutidas) não são necessariamente dos autores que mais produziram acerca do tema. As listas completas dos dez autores mais produtivos e mais citados constavam de duas tabelas em formato de imagem no documento original, cujos dados não puderam ser recuperados para esta versão.

4.3 EVOLUÇÃO DOS FOCOS DE PESQUISA

As Figuras 4, 5 e 6 exibem as redes de coocorrência de palavras-chave elaboradas para as décadas que o período de estudo abrange (1990, 2000 e 2010). Nos anos 1990 (Figura 4), foram retornados sete termos com duas ou mais ocorrências, o que denota uma rede pobre em relação à frequência de termos; eles foram divididos em dois *clusters*, onde o verde abrange as palavras referentes às técnicas do sensoriamento remoto (*remote sensing*, *algorithm*, *carbon exchange model*) empregadas nos estudos que envolviam a produção primária líquida e os ciclos biogeoquímicos, sendo estes os termos que compõem o *cluster* vermelho (*net primary production*, *biogeochemical cycle*, *vegetation model*, *climate model*).

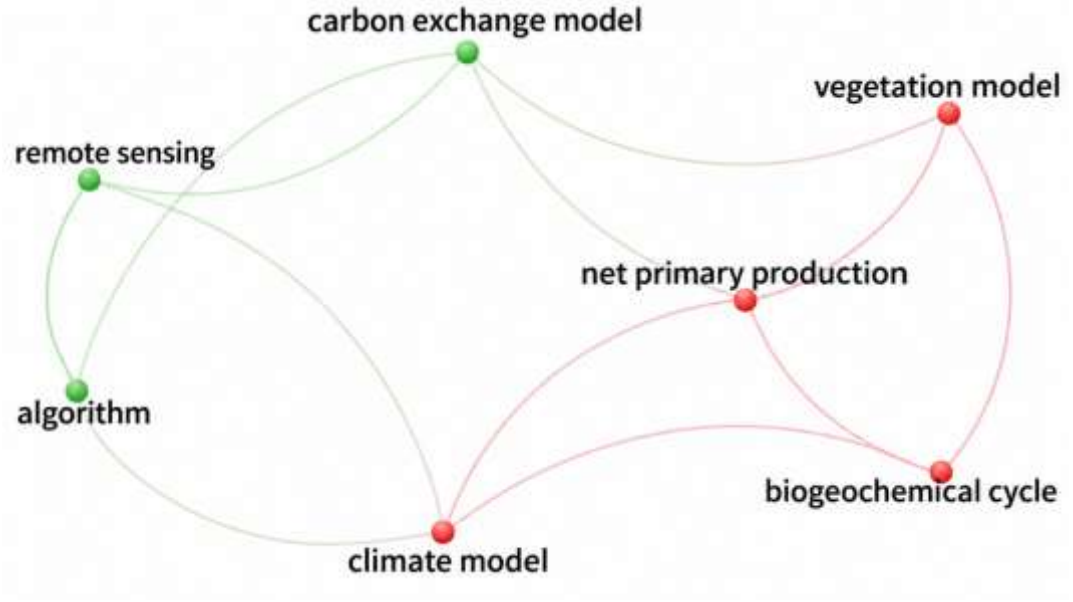
Figura 4. Rede de coocorrência de palavras-chave dos artigos publicados na década de 1990 (mínimo de duas ocorrências por termo): cluster verde, técnicas e modelos de sensoriamento remoto; cluster vermelho, produção primária líquida e ciclos biogeoquímicos.



Fonte: Elaborada pelos autores com dados da base Scopus.

Já na década seguinte (Figura 5), em que foram consideradas as palavras-chave que ocorreram quatro vezes ou mais, observa-se um aumento discreto dos termos (onze termos), que estão relacionados principalmente às técnicas de Sensoriamento Remoto e que estabelecem uma relação entre os termos *land cover* e *NDVI* com *organic carbon*, *soil carbon* e *land degradation*, evidenciando que os estudos desta época começam a debruçar-se mais acerca do entendimento da dinâmica do carbono no que tange aos tipos de cobertura da terra, inclusive com o uso dos primeiros índices espectrais derivados de imagens de satélite como covariáveis para o estudo do solo (Ju; Chen, 2005; Serbin *et al.*, 2009). É plausível que essa inflexão acompanhe o aumento da preocupação com as emissões de carbono no período: o IPCC (2022) aponta que as emissões antrópicas líquidas de gases de efeito estufa na década de 2010 foram as mais altas da história, com contribuição relevante das atividades industriais e das mudanças de uso e cobertura da terra.

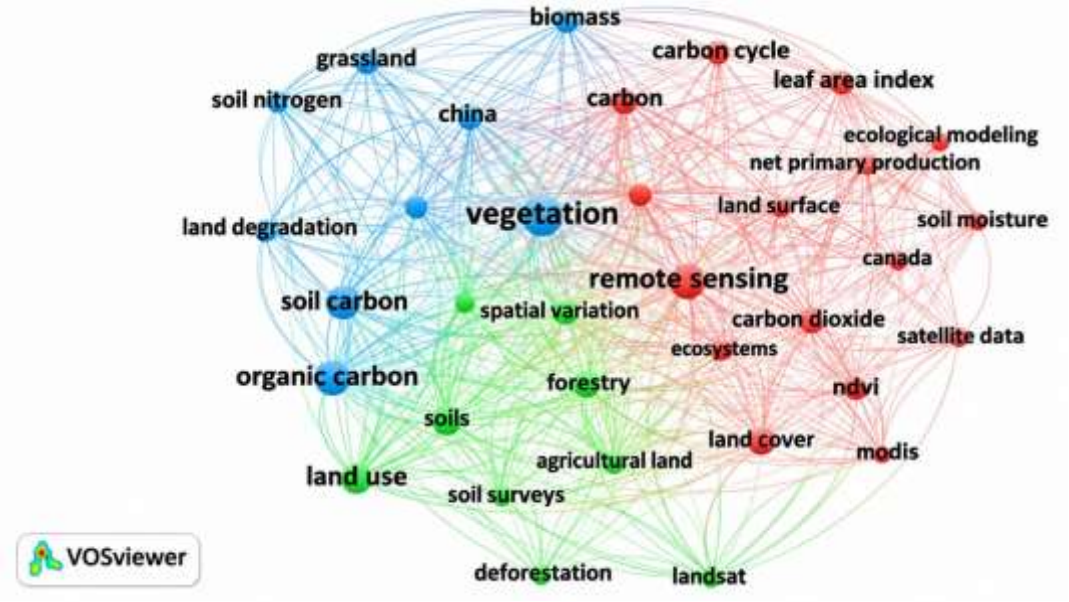
Figura 5. Rede de coocorrência de palavras-chave dos artigos publicados na década de 2000 (mínimo de quatro ocorrências por termo), destacando a ligação entre cobertura da terra e NDVI (cluster verde) e carbono orgânico, carbono do solo e degradação da terra (cluster azul).



Fonte: Elaborada pelos autores com dados da base Scopus.

Na rede gerada para a década de 2010 (Figura 6), há um enriquecimento dos termos com a inclusão de tópicos como sequestro de carbono (*carbon sequestration*) e carbono orgânico, além do termo *China*, que representa um dos países mais relevantes na publicação de artigos científicos. Ainda, nessa década, observa-se que os estudos ligados ao carbono passam a relacionar-se com diferentes tipos de uso e cobertura da terra, como floresta (*forestry*), agricultura (*agricultural land*), pastagem (*grassland*) e, mais discretamente, com a região semiárida (*semiarid region*), bem como com técnicas de análise de dados (*regression analysis*, *mean square error*) e com a dinâmica de mudança (*land use change*, *deforestation*), padrão ilustrado por estudos que relacionam respiração e estoques de carbono do solo às mudanças de uso da terra (Sheng *et al.*, 2010; Rey *et al.*, 2011; Bae; Ryu, 2015; Xin; Qin; Yu, 2016; Gomes *et al.*, 2019).

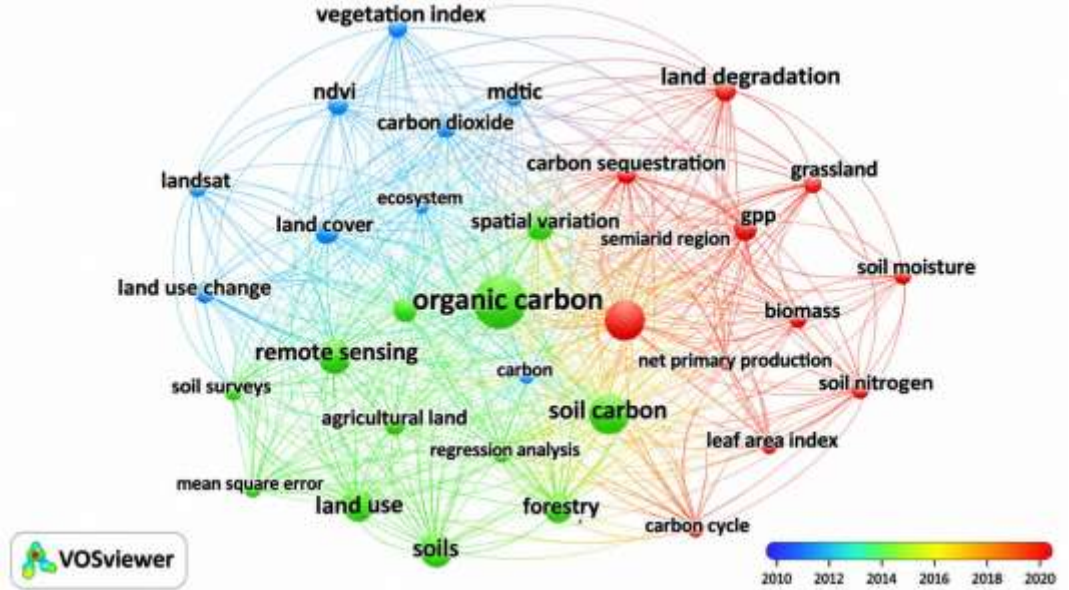
Figura 6. Rede de coocorrência de palavras-chave dos artigos publicados entre 2010 e 2020 (mínimo de seis ocorrências por termo), com três clusters: carbono orgânico, solos e uso da terra (verde); sequestro de carbono, degradação da terra, pastagem e China (vermelho); sensores, índices de vegetação e mudança de cobertura (azul).



Fonte: Elaborada pelos autores com dados da base Scopus.

A rede de termos que abrange todo o período apresenta uma variedade de abordagens de pesquisa e possibilidades de aplicações a partir do Sensoriamento Remoto. Como retorno, a rede indicou 34 palavras, que ocorreram pelo menos sete vezes, em um grupo que englobou 1000 termos, sendo que os mais frequentes foram carbono orgânico (87 ocorrências), vegetação (31 ocorrências), Sensoriamento Remoto (28 ocorrências) e uso da terra (25 ocorrências) (Figura 7).

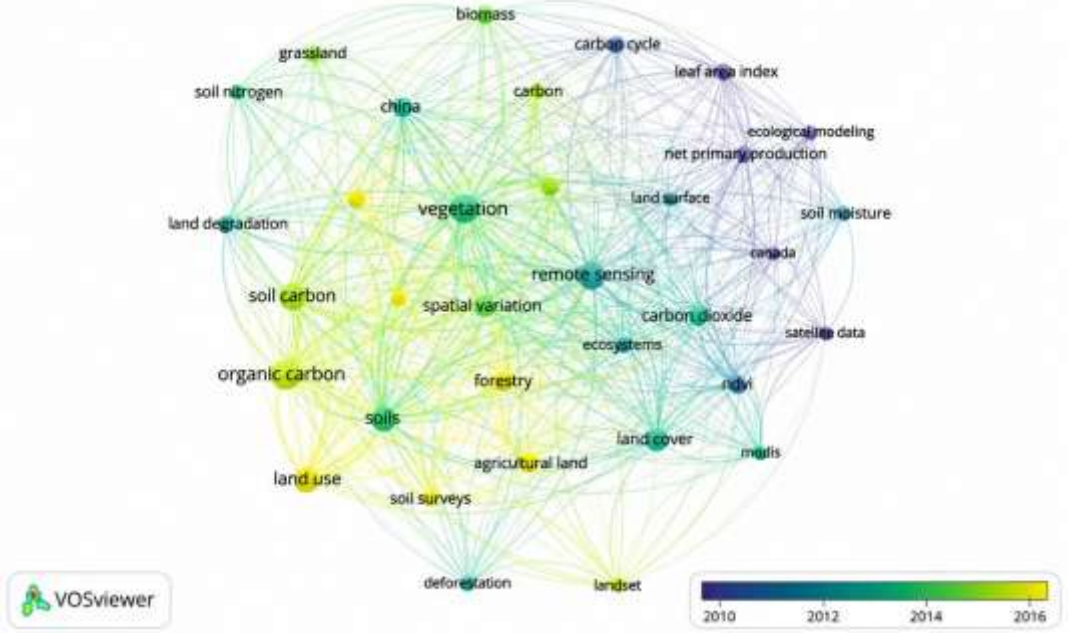
Figura 7. Rede de coocorrência de palavras-chave para todo o período (1995–2020), com 34 termos de pelo menos sete ocorrências: cluster vermelho, métodos e dados aplicados à produção primária líquida e ao ciclo do carbono; cluster verde, tipos e mudanças de uso e cobertura da terra; cluster azul, carbono orgânico, degradação do solo e vegetação.



Fonte: Elaborada pelos autores com dados da base Scopus.

A rede é dividida em três *clusters*: na cor vermelha estão os termos que se associam às metodologias aplicadas ao estudo da Produção Primária Líquida e ao ciclo do carbono, como por exemplo o Índice de Área Foliar (que aparece em 11 publicações) e o NDVI (com 14 ocorrências), assim como os dados de satélite e uma de suas fontes de dados, o sensor MODIS (7 ocorrências). Em verde, aparecem as palavras relacionadas aos diferentes tipos de uso e cobertura da terra (*agricultural land*; *forestry*), bem como os termos *deforestation* e *spatial variation*, que indicam um processo de mudança no uso e cobertura da terra; neste *cluster* foi observado o predomínio da aplicação do sensor Landsat. Já na cor azul, denotam-se os termos mais abrangentes, ligados a estudos pedológicos e ao estoque de carbono, onde se destacam os temas carbono orgânico, degradação do solo e vegetação. Destaca-se também o termo *China*, como uma relevante unidade espacial de investigação nos artigos. Os três *clusters* reproduzem a tríade que define o campo — métodos de SR, tipos e mudanças de cobertura e carbono do solo como variável-resposta. A dimensão temporal dessa estrutura é apresentada na Figura 8, em visualização de sobreposição.

Figura 8. Rede de coocorrência de palavras-chave para todo o período (1995–2020) em visualização de sobreposição, na qual a cor de cada termo indica o ano médio de publicação dos artigos em que ocorre (escala de 2010 a 2016): tons azuis correspondem a termos mais antigos e tons amarelos, a termos mais recentes no conjunto analisado.



Fonte: Elaborada pelos autores com dados da base Scopus.

A Figura 8 apresenta os termos mais relevantes ao longo do tempo, indicando o período em que cada sensor, índice ou tipo de uso e cobertura esteve em destaque nas discussões acerca da dinâmica do carbono e dos diferentes tipos de uso e cobertura da terra. Os termos *MODIS*, *NDVI*, *leaf area index*, *net primary production*, *satellite data* e *ecological modeling* apresentam ano médio de publicação mais

antigo (tons azuis, em torno de 2010–2012), o que indica que esses instrumentos e abordagens concentraram-se na primeira metade do período de maior produção. Os termos com ano médio mais recente (tons amarelos, próximos de 2016) incluem *landsat*, *land use*, *soils*, *soil surveys*, *deforestation* e os tipos de cobertura *grassland*, *forestry* e *agricultural land*, demonstrando que a aplicação do sensor Landsat tem-se destacado nos anos mais recentes, bem como o interesse relacionado às pesquisas que buscam compreender a dinâmica do carbono em diferentes cenários de uso e cobertura. Essa transição é coerente com a abertura do acervo Landsat (Wulder *et al.*, 2012), cuja resolução de 30 m favorece análises em escala de paisagem.

4.4 SENSORES, ABORDAGENS METODOLÓGICAS E ÁREAS DE ESTUDO DOS ARTIGOS MAIS CITADOS

O conjunto de dados dos vinte e seis artigos mais citados corresponde a 76,4% do total de citações recebidas pelos 86 artigos, cerca de 2.882 citações em um quadro geral que compreende 3.772 citações. O artigo mais citado, de Yuan *et al.* (2007), que deriva um modelo de eficiência do uso da luz a partir de dados de covariância de vórtices para estimar a produção primária bruta diária em diferentes biomas, acumulava 397 citações (10,5%), cerca de 1,6 vez o total do segundo, a revisão de Sellers *et al.* (1995) sobre o sensoriamento remoto da superfície terrestre em estudos de mudança global, com 245 citações (6,5%). Os Quadros 2 e 3 sintetizam, para os artigos classificados do 1º ao 13º e do 14º ao 26º lugar, respectivamente, o periódico, os sensores ou fontes de dados, as abordagens metodológicas, a área de estudo e o número de citações.

De modo geral, os sensores mais explorados foram os da série Landsat, presente em nove dos 26 trabalhos (34,6%), seguido pelo MODIS, usado em seis publicações (23,1%), AVHRR, em cinco (19,2%), e SPOT, em dois artigos (7,7%) (Figura 9). Em dois dos 26 trabalhos utilizaram-se espectrorradiômetros de campo (FieldSpec Pro), instrumentos passivos de alta resolução espectral empregados na caracterização de solos e resíduos culturais, e em um deles explorou-se o sensoriamento remoto aerotransportado por espectroscopia de imageamento (AVIRIS). Outra importante observação é a não existência, entre os artigos mais citados, de estudos em região do semiárido brasileiro com o uso do sensor Landsat.

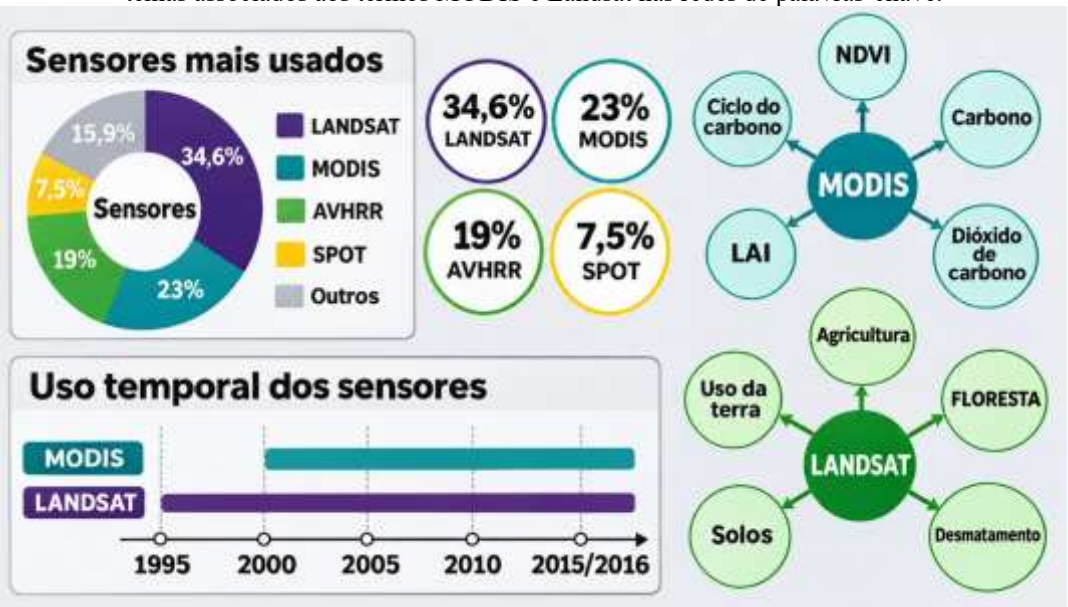
Tabela 2. Síntese dos artigos classificados do 1º ao 13º lugar entre os 26 mais citados da amostra (30% dos 86 artigos), por número de citações na base Scopus: periódico, sensores ou fontes de dados de sensoriamento remoto, abordagens metodológicas e área de estudo.

Nº	Artigo	Periódico	Sensores / dados de SR	Abordagens metodológicas	Área de estudo	Total de citações
1	Yuan et al., 2007	Agric. For. Meteorol.	MODIS (NDVI)	Modelo LUE; covariância de vórtices (AmeriFlux)	Múltiplos biomas	397
2	Sellers et al., 1995	Remote Sens. Environ.	–	Revisão (modelos, algoritmos, experimentos)	–	245
3	Hall et al., 1995	Remote Sens. Environ.	–	Revisão de algoritmos de SR	–	202
4	Sheng et al., 2010	Glob. Change Biol.	–	Campo; laboratório; estatística	China subtropical	169
5	Feng et al., 2007	J. Environ. Manage.	MODIS (LAI, NDVI); Landsat	Modelo BEPS	China	167
6	Rey et al., 2011	Soil Biol. Biochem.	MODIS (EVI)	Campo; modelo empírico	SE da Espanha (semiárido)	141
7	Daughtry et al., 2004	Remote Sens. Environ.	Espectrorradiômetro (FieldSpec Pro)	Dados espectrais de campo	Beltsville, EUA	133
8	Zhang et al., 2011	Geoderma	–	Campo; Walkley-Black; ANOVA	Planalto de Loess, China (semiárido)	124
9	Seaquist et al., 2003	Ecol. Model.	AVHRR (NDVI)	Modelo LUE; Monte Carlo; CENTURY	Sahel (árido/semiárido)	112
10	Gonsamo et al., 2013	J. Geophys. Res. Biogeosci.	MODIS; torres de fluxo de CO_2	Índice fenológico; estatística	Canadá	91
11	Cowling e Field, 2003	Global Biogeochem. Cycles	–	Revisão	–	89
12	Bae e Ryu, 2015	Landsc. Urban Plan.	MODIS (NDVI); Landsat 7 e 8	Campo; analisador elementar de C	Seul, Coreia do Sul	84
13	Yu et al., 2009	Int. J. Remote Sens.	AVHRR (NDVI); SPOT	Modelo CASA aprimorado	Ásia Oriental	84

Fonte: Elaborada pelos autores

Os sensores Landsat e MODIS se destacam desde a publicação dos primeiros trabalhos observados, sendo o primeiro com aplicações mais recentes. Ambos possuem temáticas que perpassam pelo uso do sensoriamento remoto e dinâmica do carbono (Figura 9), entretanto com enfoques diferentes: o termo *MODIS* está associado às discussões voltadas ao uso das técnicas, a exemplo dos índices espectrais, enquanto o *Landsat* está atrelado ao entendimento da dinâmica do carbono em diferentes cenários de uso e cobertura. Essa complementaridade decorre da resolução dos sensores: diária e de 250 m a 1 km no MODIS, adequada à modelagem regional de produtividade, e de 30 m no Landsat, que permite discriminar parcelas de uso da terra (Xiao *et al.*, 2019).

Figura 9. Sensores mais utilizados nos 26 artigos mais citados: (esquerda) frequência relativa de Landsat, MODIS, AVHRR e SPOT e período predominante de uso de MODIS e Landsat ao longo da série 1995–2020; (direita) principais temas associados aos termos MODIS e Landsat nas redes de palavras-chave.



Fonte: Elaborada pelos autores com dados da base Scopus.

Quanto ao foco principal de estudo (Figura 10), dez artigos trataram do estoque de carbono no solo (38,4%), oito buscavam compreender a relação dos tipos de cobertura da terra com a dinâmica da relação terra-atmosfera (30,7%), cinco trataram da produção primária líquida (19,2%) e três discutiam o ciclo do carbono (11,5%). Porém, cabe salientar que, mesmo com focos de trabalho diferentes, todos os artigos discorrem sobre a mesma linha de pesquisa, uma vez que todos buscam, de forma geral, discutir a dinâmica do carbono a partir de algum fator que atua como regulador do mesmo.

Quadro 3. Síntese dos artigos classificados do 14º ao 26º lugar entre os 26 mais citados da amostra, por número de citações na base Scopus: periódico, sensores ou fontes de dados de sensoriamento remoto, abordagens metodológicas e área de estudo.

Nº	Artigo	Periódico	Sensores / dados de SR	Abordagens metodológicas	Área de estudo	Total de citações
14	Xin et al., 2016	Catena	SPOT; Landsat (NDVI)	SIG; correlação, ANOVA, regressão	Planalto de Loess, China	83
15	Potter et al., 1998	Glob. Change Biol.	AVHRR (NDVI)	Modelo CASA; balanço hídrico	Amazônia brasileira	83
16	Gomes et al., 2019	Geoderma	MODIS (NDVI)	Random Forest, Cubist, SVM e outros; RFE	Brasil	81
17	Asner et al., 2003	Ecol. Appl.	AVIRIS (aerotransportado)	Campo; mistura espectral	Deserto do Monte, Argentina	81
18	Wang, B. et al., 2018a	Ecol. Indic.	Landsat 8 (sete índices)	Algoritmo genético; Random Forest	Leste da Austrália (semiárido)	70
19	Serbin et al., 2009	Soil Sci. Soc. Am. J.	Landsat; FieldSpec Pro FR	Campo; estatística	Sudoeste dos EUA	69
20	Steyaert e Knox, 2008	J. Geophys. Res. Atmos.	Landsat; MODIS (albedo)	Reconstrução histórica em SIG	Leste dos EUA	65
21	Potter et al., 2001	J. Geophys. Res. Atmos.	AVHRR (NDVI)	Modelo CASA; SIG	Amazônia brasileira	58
22	Gray et al., 2015	Soil Sci. Soc. Am. J.	–	Regressão múltipla; Cubist	Leste da Austrália	56
23	Ju e Chen, 2005	Hydrol. Process.	–	Modelos CENTURY e InTEC	Canadá	53
24	Wang, S. et al., 2018b	Ecol. Indic.	Landsat 5	Campo; interpolação; BRT	NE da China (costeiro)	52
25	Grinand et al., 2017	Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.	Landsat	Random Forest; Walkley-Black	SE de Madagascar	47
26	Vicharnakorn et al., 2014	Remote Sens.	Landsat	Campo; classificação híbrida	Savannakhet, Laos	46

Fonte: Elaborado pelos autores com dados da base Scopus (Elsevier, 2021). SVM = máquina de vetores de suporte; RFE = recursive feature elimination; BRT = boosted regression trees; SIG = sistema de informação geográfica.

Figura 10. Foco principal de estudo dos 26 artigos mais citados: estoque de carbono no solo; tipos de uso e cobertura da terra e dinâmica do carbono; produção primária líquida; e ciclo do carbono.



Fonte: Elaborada pelos autores com dados da base Scopus.

As principais abordagens metodológicas aplicadas foram o modelo de Eficiência do Uso da Luz (LUE), os índices espectrais (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI, *Leaf Area Index* – LAI e *Enhanced Vegetation Index* – EVI) e os modelos de simulação, como o modelo de matéria orgânica do solo CENTURY e o modelo CASA (NASA), além dos modelos BEPS e InTEC, para estimar o carbono no solo e a produtividade, bem como o uso de algoritmos de classificação e regressão para a elaboração de mapas de uso e cobertura e de estoques de carbono (Random Forest; Cubist) (Gray; Bishop; Wilson, 2015; Gomes *et al.*, 2019) e também revisões bibliográficas (Quadros 2 e 3). A trajetória visível nos Quadros 2 e 3 — dos modelos de produtividade com AVHRR e MODIS aos mapas de COS por aprendizado de máquina com covariáveis Landsat após 2015 — reproduz a evolução descrita por Xiao *et al.* (2019) e por Wadoux, Minasny e McBratney (2020). Os modelos de simulação também são destaque nas abordagens utilizadas, tais como CASA e CENTURY; a dificuldade de acesso aos dados necessários para o estudo da dinâmica do carbono é apontada como uma das principais motivações para a utilização de abordagens como essas (Sellers *et al.*, 1995). O NDVI apresentou grande recorrência entre os estudos analisados e, nas redes de coocorrência, estabelece ligações com termos como *carbon sequestration* e *soil carbon* (Sellers *et al.*, 1995; Hall; Townshend; Engman, 1995; Potter *et al.*, 2001), o que indica sua consolidação como covariável de entrada tanto em modelos de produtividade quanto em modelos empíricos de COS.

Em relação às áreas de estudo, mais precisamente às características biofísicas destas, apenas quatro estudos foram realizados em ambientes áridos ou semiáridos, entretanto nenhum em território brasileiro; tais estudos desenvolveram-se no sudeste da Espanha (Rey *et al.*, 2011), no norte da China

(Zhang *et al.*, 2011), no leste da Austrália (Wang *et al.*, 2018a) e no Sahel da África Ocidental (Seaquist; Olsson; Ardö, 2003). Outros dois trabalhos foram desenvolvidos na região da Amazônia brasileira (Potter *et al.*, 1998; Potter *et al.*, 2001), e as demais pesquisas em áreas costeiras, desérticas ou subtropicais da China, da República da Coreia, do Canadá, de Madagascar, dos Estados Unidos, da Argentina e do Laos (Quadro 3). Dos trabalhos mais citados, o de Wang *et al.* (2018a) utiliza imagens Landsat 8 e a aplicação de diferentes índices de vegetação (NDVI, EVI, SAVI, MSAVI, NDMI, NBR e NBR2) para estimar o estoque de carbono orgânico em ambiente semiárido, apontando ainda que as variáveis solo exposto e precipitação são elementos importantes para explicar a variabilidade no estoque do carbono — um desenho experimental diretamente transferível para a Caatinga.

4.5 LACUNAS IDENTIFICADAS: COMPUTAÇÃO EM NUVEM E REGIÕES SEMIÁRIDAS

Uma importante observação foi a ausência, entre os artigos mais citados, de aplicações de plataformas de computação em nuvem, como o Google Earth Engine (Gorelick *et al.*, 2017). Visto a potencialidade do GEE, esperava-se encontrar artigos que fizessem sua aplicação em estudos desta natureza. Essa ausência deve ser interpretada com cautela: o artigo de referência da plataforma data de 2017, a amostra dos mais citados privilegia trabalhos antigos e a string de busca não incluiu termos relativos a plataformas de processamento. Revisões específicas registram 349 artigos com GEE em 146 periódicos até 2019, 90% deles baseados em dados de sensoriamento remoto e com predomínio de Landsat e Random Forest (Tamiminia *et al.*, 2020). Em escala nacional, a plataforma viabilizou séries anuais de uso e cobertura da terra para todos os biomas brasileiros (Souza *et al.*, 2020) e, especificamente para a Caatinga, a reconstrução da dinâmica da cobertura entre 1985 e 2019, que revelou perda de cerca de 11% da vegetação nativa (Franca Rocha *et al.*, 2024). Aplicações em unidades de conservação brasileiras (Azevedo; Barbosa, 2020; Carvalho; Magalhães Filho; Santos, 2021) ilustram a difusão da ferramenta. A lacuna identificada, portanto, não é a inexistência de estudos com GEE, mas a escassa integração, até 2020, entre essa capacidade de processamento e a estimativa de estoques e fluxos de carbono do solo em função do uso e cobertura da terra — integração que o mapeamento digital de solos em nuvem começa a oferecer (Wadoux; Minasny; McBratney, 2020; Poggio *et al.*, 2021).

A segunda lacuna é territorial. Mesmo identificando pesquisas direcionadas ao entendimento da dinâmica do carbono relacionado aos diferentes tipos de uso e cobertura em ambientes áridos ou semiáridos (Planalto de Loess, China; Sahel da África Ocidental; sudeste da Espanha; leste da Austrália) (Seaquist; Olsson; Ardö, 2003; Zhang *et al.*, 2011; Rey *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2018a), a maior concentração das pesquisas está direcionada às regiões úmidas e subúmidas, a exemplo da

Amazônia. Essa assimetria contrasta com a importância das regiões secas no ciclo global do carbono: os ecossistemas semiáridos dominam a tendência e a variabilidade interanual do sumidouro terrestre de CO_2, em razão da forte sensibilidade de sua produtividade à precipitação (Poulter *et al.*, 2014; Ahlström *et al.*, 2015). Na Caatinga, a conversão da vegetação nativa em pastagens e cultivos reduz em mais da metade os estoques de carbono do ecossistema, com perdas semelhantes no solo e na biomassa (Menezes *et al.*, 2021), e a perda acumulada de vegetação nativa nas últimas décadas (Franca Rocha *et al.*, 2024) implica emissões cuja magnitude espacial permanece pouco quantificada. Desta forma, como apontado por Rey *et al.* (2011) para as estepes semiáridas, o desenvolvimento de mais trabalhos voltados à compreensão da dinâmica do carbono em ambientes áridos ou semiáridos, a exemplo do bioma brasileiro da Caatinga, é de suma importância, visto que estes estudos são pouco explorados e/ou divulgados. Exemplo disto são os trabalhos existentes no banco de dissertações do Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente (PPGM) que discutem a relação do carbono com os diferentes tipos de uso e cobertura da terra, como a modelagem do carbono orgânico do solo por espectrorradiometria em Morro do Chapéu, Bahia (Silva, 2020), mas que não foram encontrados na busca realizada na base Scopus, por não terem sido publicados em periódicos indexados.

4.6 LIMITAÇÕES DA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Os resultados devem ser lidos à luz de limitações próprias do método e das escolhas deste estudo. Em primeiro lugar, a cobertura da base: a Scopus, embora ampla, não indexa a totalidade dos periódicos, e tanto ela quanto a Web of Science sobrerrepresentam publicações em inglês e de editoras do hemisfério norte (Mongeon; Paul-Hus, 2016; Martín-Martín *et al.*, 2021). Ainda que a busca tenha admitido artigos em português e espanhol, a cobertura de periódicos nesses idiomas é reduzida (Vera-Baceta; Thelwall; Kousha, 2019), o que tende a subestimar a produção brasileira e latino-americana sobre a Caatinga e outros ambientes secos, frequentemente veiculada em periódicos nacionais e em dissertações e teses. A ausência de estudos no semiárido brasileiro deve, portanto, ser entendida como ausência na literatura indexada e mais citada, e não como inexistência de pesquisa.

Em segundo lugar, a estratégia de busca: a string exigiu a coocorrência de termos de sensoriamento remoto, carbono do solo, uso e cobertura da terra, de modo que estudos que empreguem sinônimos (por exemplo, *soil organic matter*, *carbon stock*, *land use change* sem o termo *land cover*) ou sensores não mencionados nos campos pesquisados podem ter ficado fora do conjunto; a precedência de operadores na primeira cláusula, discutida na seção 3.2, reforça a necessidade de parênteses explícitos em replicações. Em terceiro lugar, a janela temporal: a busca encerra-se em 2020,

antes da expansão mais recente dos métodos em nuvem, dos sensores Sentinel e dos modelos de aprendizado profundo, de modo que as lacunas aqui apontadas retratam o estado do campo até aquele ano. Em quarto lugar, a amostra de leitura integral, definida pelos 30% de artigos mais citados, favorece trabalhos antigos e de caráter metodológico geral, como as revisões de Sellers *et al.* (1995) e Hall, Townshend e Engman (1995), e sub-representa inovações recentes; as contagens de citações, além disso, referem-se à data da extração e continuam a mudar. Por fim, os limiares de ocorrência e o *thesaurus* manual envolvem decisões do analista que afetam a composição dos *clusters*, e as versões dos softwares não foram registradas.

Apesar dessas restrições, o estudo oferece uma contribuição de síntese metodológica e territorial: organiza quantitativamente a trajetória de 25 anos de um campo interdisciplinar, identifica os sensores, modelos e algoritmos de seus trabalhos mais influentes e localiza as regiões e ferramentas subexploradas, fornecendo um ponto de partida para a agenda de pesquisa sobre carbono do solo e uso da terra no semiárido brasileiro.

5 CONCLUSÃO

Constatou-se um crescimento no número de publicações ao longo do tempo, com taxa anual de 7,97% e concentração de 72% dos artigos na década de 2010, apontando a construção de um importante interesse social quanto aos estudos que buscam a identificação de meios que permitam que o desenvolvimento ocorra de maneira sustentável, sem grandes ônus para o ambiente, ligando-se também aos interesses regionais ou locais, que se inclinam aos estudos voltados à conservação dos solos e na execução do manejo mais adequado. Catena e Geoderma foram os periódicos mais produtivos, e China e Estados Unidos, os países de maior contribuição.

A partir da revisão sistemática da análise bibliométrica, constatou-se que as principais tendências estão voltadas ao entendimento do carbono no solo e como os diferentes tipos de uso e cobertura da terra influenciam ou interagem com o mesmo, apoiando-se em técnicas do sensoriamento remoto para o seu desenvolvimento. As redes de palavras-chave mostraram a passagem dos modelos de produção primária, nos anos 1990, para a quantificação de estoques e do sequestro de carbono em diferentes coberturas, nos anos 2010, com o protagonismo do MODIS cedendo lugar ao do Landsat; nos artigos mais citados, predominaram índices de vegetação, modelos de eficiência do uso da luz e de simulação e, mais recentemente, aprendizado de máquina.

Em relação às áreas de estudo, grande parte das pesquisas mais citadas foi desenvolvida em regiões úmidas a subúmidas, com grande presença de vegetação florestal, não sendo identificado nenhum trabalho desenvolvido em região semiárida brasileira nem o uso do sensor Landsat nessas

áreas, o que reforça a necessidade da realização de estudos voltados à temática em biomas como a Caatinga. Além disso, os resultados apontaram que recursos como o Google Earth Engine foram praticamente inexplorados, até 2020, nos estudos mais citados dessa natureza, havendo um amplo campo de pesquisa a ser explorado na integração entre processamento em nuvem, séries temporais de uso e cobertura da terra e modelagem do carbono do solo.

Essas conclusões restringem-se à literatura indexada na Scopus até 2020 e à amostra dos artigos mais citados. Pesquisas futuras devem ampliar a busca a outras bases e idiomas, incluir termos relativos a plataformas em nuvem e sensores recentes, atualizar o recorte temporal e, sobretudo, aplicar os métodos aqui mapeados — índices de vegetação em séries Landsat, covariáveis ambientais e aprendizado de máquina em ambiente GEE — à quantificação dos estoques de carbono do solo em diferentes usos e coberturas da Caatinga.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), por meio do edital CNPq/MCTI nº 441271/2023-5 – Presente, Passado e Futuro da Biodiversidade do Semiárido: Inventários, Monitoramento, Impactos das Mudanças Climáticas e Implicações para o Uso e Conservação da Flora, Fauna e Fungos. W.J.F.R. foi apoiado por bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq (processo nº 314954/2021-0), Projeto Prospecta 4.0 – CNPq (processo nº 407907/2022-0) e pelo projeto 30202010010121001 – CTBIO – FINEP, associada ao Centro Temático de Bioeconomia do Semiárido (UEFS – CTBio-CIMATEC SERTÃO). Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estudos Interdisciplinares e Transdisciplinares em Ecologia e Evolução (INCT IN-TREE), financiado pelo CNPq (408930/2024-1), pela CAPES (88887.195651/2025-00) e pela FAPESP. Financiamento adicional foi fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), por meio do programa Bioeconomia, Recursos Hídricos e Sustentabilidade Ambiental na Bahia, no âmbito da Chamada nº 38/2022, Acordo de Cooperação Técnica nº 294/2023 e Termo de Outorga nº PPF0003/2023. Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente (PPGM/UEFS) pelo apoio institucional, bem como ao SENAI CIMATEC pela contribuição no desenvolvimento científico e tecnológico voltado à inovação aplicada. R.N.V. foi apoiado pelo INCT IN-TREE e agradece a bolsa SET-G 30202010010121001 – CTBIO – FINEP, associada ao Centro Temático de Bioeconomia do Semiárido (UEFS – CTBio-CIMATEC SERTÃO), vinculado a Projetos Especiais.

REFERÊNCIAS

AHLSTRÖM, Anders; RAUPACH, Michael R.; SCHURGERS, Guy *et al.* The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO_2 sink. Science, v. 348, n. 6237, p. 895-899, 2015. DOI: https://doi.org/10.1126/science.aaa1668.

AMANI, Meisam; GHORBANIAN, Arsalan; AHMADI, Seyed Ali *et al.* Google Earth Engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: a comprehensive review. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, v. 13, p. 5326-5350, 2020. DOI: https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052.

ANGELOPOULOU, Theodora; TZIOLAS, Nikolaos; BALAFOUTIS, Athanasios *et al.* Remote sensing techniques for soil organic carbon estimation: a review. Remote Sensing, v. 11, n. 6, 676, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/rs11060676.

ARIA, Massimo; CUCCURULLO, Corrado. bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis. Journal of Informetrics, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007.

ASNER, Gregory P.; BORGHI, Carlos E.; OJEDA, Ricardo A. Desertification in central Argentina: changes in ecosystem carbon and nitrogen from imaging spectroscopy. Ecological Applications, v. 13, n. 3, p. 629-648, 2003. DOI: https://doi.org/10.1890/1051-0761(2003)013[0629:dicaci]2.0.co;2.

AZEVEDO, Laízy de Santana; BARBOSA, Leonardo Carlos. Estudo do índice de vegetação e temperatura da superfície terrestre na Área de Proteção Ambiental Triunfo do Xingu (PA) utilizando o Google Earth Engine. Revista de Geociências do Nordeste, v. 6, n. 2, p. 244-256, 2020. DOI: https://doi.org/10.21680/2447-3359.2020v6n2ID21984.

BAE, Jeehwan; RYU, Youngryel. Land use and land cover changes explain spatial and temporal variations of the soil organic carbon stocks in a constructed urban park. Landscape and Urban Planning, v. 136, p. 57-67, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.11.015.

BALDOCCHI, Dennis D. How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of Global Change Biology. Global Change Biology, v. 26, n. 1, p. 242-260, 2020. DOI: https://doi.org/10.1111/gcb.14807.

BEILLOUIN, Damien; CORBEELS, Marc; DEMENOIS, Julien *et al.* A global meta-analysis of soil organic carbon in the Anthropocene. Nature Communications, v. 14, 3700, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-023-39338-z.

BOSSIO, D. A.; COOK-PATTON, S. C.; ELLIS, P. W. *et al.* The role of soil carbon in natural climate solutions. Nature Sustainability, v. 3, n. 5, p. 391-398, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z.

CARVALHO, Wesley dos Santos; MAGALHÃES FILHO, Fernando Jorge Corrêa; SANTOS, Thayene Lima dos. Uso e cobertura do solo utilizando a plataforma Google Earth Engine (GEE): estudo de caso em uma unidade de conservação. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 2, p. 15280-15300, 2021. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-243.

COBO, M. J.; LÓPEZ-HERRERA, A. G.; HERRERA-VIEDMA, E. *et al.* Science mapping software tools: review, analysis, and cooperative study among tools. Journal of the American Society for Information Science and Technology, v. 62, n. 7, p. 1382-1402, 2011. DOI: https://doi.org/10.1002/asi.21525.

COWLING, Sharon A.; FIELD, Chris B. Environmental control of leaf area production: implications for vegetation and land-surface modeling. Global Biogeochemical Cycles, v. 17, n. 1, 2003. DOI: https://doi.org/10.1029/2002gb001915.

DAUGHTRY, Craig S. T.; HUNT, E. Raymond; MCMURTREY, James E. Assessing crop residue cover using shortwave infrared reflectance. Remote Sensing of Environment, v. 90, n. 1, p. 126-134, 2004. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.023.

DON, Axel; SCHUMACHER, Jens; FREIBAUER, Annette. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. Global Change Biology, v. 17, n. 4, p. 1658-1670, 2011. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x.

DONG, Taifeng; LIU, Jiangui; SHANG, Jiali *et al.* Assessment of red-edge vegetation indices for crop leaf area index estimation. Remote Sensing of Environment, v. 222, p. 133-143, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.032.

DONTHU, Naveen; KUMAR, Satish; MUKHERJEE, Debmalya *et al.* How to conduct a bibliometric analysis: an overview and guidelines. Journal of Business Research, v. 133, p. 285-296, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070.

ELSEVIER. Scopus: content coverage guide. Amsterdam: Elsevier, 2021. Disponível em: https://www.elsevier.com/products/scopus/content. Acesso em: 13 nov. 2026.

ELSEVIER. Boolean searches in Scopus: understanding operator precedence and best practices. Amsterdam: Elsevier, 2025. Disponível em: https://www.elsevier.com/products/scopus/resources/boolean-searches-in-scopus. Acesso em: 13 nov. 2026.

FENG, X.; LIU, G.; CHEN, J. M. *et al.* Net primary productivity of China's terrestrial ecosystems from a process model driven by remote sensing. Journal of Environmental Management, v. 85, n. 3, p. 563-573, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.09.021.

FRANCA ROCHA, Washington J. S.; VASCONCELOS, Rodrigo N.; COSTA, Diego P. *et al.* Towards uncovering three decades of LULC in the Brazilian drylands: Caatinga biome dynamics (1985–2019). Land, v. 13, n. 8, 1250, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/land13081250.

GOMES, Lucas Carvalho; FARIA, Raiza Moniz; DE SOUZA, Eliana *et al.* Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. Geoderma, v. 340, p. 337-350, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.007.

GONSAMO, Alemu; CHEN, Jing M.; PRICE, David T. *et al.* Improved assessment of gross and net primary productivity of Canada's landmass. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, v. 118, n. 4, p. 1546-1560, 2013. DOI: https://doi.org/10.1002/2013jg002388.

GORELICK, Noel; HANCHER, Matt; DIXON, Mike *et al.* Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, v. 202, p. 18-27, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031.

GRAY, Jonathan M.; BISHOP, Thomas F. A.; WILSON, Brian R. Factors controlling soil organic carbon stocks with depth in eastern Australia. Soil Science Society of America Journal, v. 79, n. 6, p. 1741-1751, 2015. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj2015.06.0224.

GRINAND, C.; LE MAIRE, G.; VIEILLEDENT, G. *et al.* Estimating temporal changes in soil carbon stocks at ecoregional scale in Madagascar using remote-sensing. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 54, p. 1-14, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.09.002.

GUO, L. B.; GIFFORD, R. M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. Global Change Biology, v. 8, n. 4, p. 345-360, 2002. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x.

HALL, Forrest G.; TOWNSHEND, John R.; ENGMAN, Edwin T. Status of remote sensing algorithms for estimation of land surface state parameters. Remote Sensing of Environment, v. 51, n. 1, p. 138-156, 1995. DOI: https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00071-T.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Agriculture, forestry and other land uses (AFOLU). In: IPCC. Climate change 2022: mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. cap. 7, p. 747-860. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009157926.009.

JU, Weimin; CHEN, Jing M. Distribution of soil carbon stocks in Canada's forests and wetlands simulated based on drainage class, topography and remotely sensed vegetation parameters. Hydrological Processes, v. 19, n. 1, p. 77-94, 2005. DOI: https://doi.org/10.1002/hyp.5775.

KUMAR, Lalit; MUTANGA, Onisimo. Google Earth Engine applications since inception: usage, trends, and potential. Remote Sensing, v. 10, n. 10, 1509, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/rs10101509.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1097396.

LAL, R.; FOLLETT, R. F.; STEWART, B. A. *et al.* Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. Soil Science, v. 172, n. 12, p. 943-956, 2007. DOI: https://doi.org/10.1097/ss.0b013e31815cc498.

LIMA JÚNIOR, C.; ACCIOLY, L. J. O.; GIONGO, V. *et al.* Estimativa de biomassa lenhosa da caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação. Scientia Forestalis, v. 42, n. 102, p. 289-298, 2014.

MARTÍN-MARTÍN, Alberto; THELWALL, Mike; ORDUNA-MALEA, Enrique *et al.* Google Scholar, Microsoft Academic, Scopus, Dimensions, Web of Science, and OpenCitations' COCI: a multidisciplinary comparison of coverage via citations. Scientometrics, v. 126, n. 1, p. 871-906, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s11192-020-03690-4.

MENEZES, Rômulo Simões Cezar; SALES, Aldo Torres; PRIMO, Dário Costa *et al.* Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. Geoderma, v. 390, 114943, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114943.

MILNE, Eleanor; BANWART, Steven A.; NOELLEMEYER, Elke *et al.* Soil carbon, multiple benefits. Environmental Development, v. 13, p. 33-38, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envdev.2014.11.005.

MINASNY, Budiman; MALONE, Brendan P.; MCBRATNEY, Alex B. *et al.* Soil carbon 4 per mille. Geoderma, v. 292, p. 59-86, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002.

MONGEON, Philippe; PAUL-HUS, Adèle. The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. Scientometrics, v. 106, n. 1, p. 213-228, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5.

POGGIO, Laura; DE SOUSA, Luis M.; BATJES, Niels H. *et al.* SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. SOIL, v. 7, n. 1, p. 217-240, 2021. DOI: https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021.

POTTER, Christopher S.; DAVIDSON, Eric A.; KLOOSTER, Steve A. *et al.* Regional application of an ecosystem production model for studies of biogeochemistry in Brazilian Amazonia. Global Change Biology, v. 4, n. 3, p. 315-333, 1998. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00154.x.

POTTER, Christopher; KLOOSTER, Steven; DE CARVALHO, Claudio Reis *et al.* Modeling seasonal and interannual variability in ecosystem carbon cycling for the Brazilian Amazon region. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 106, n. D10, p. 10423-10446, 2001. DOI: https://doi.org/10.1029/2000JD900563.

POULTER, Benjamin; FRANK, David; CIAIS, Philippe *et al.* Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle. Nature, v. 509, n. 7502, p. 600-603, 2014. DOI: https://doi.org/10.1038/nature13376.

PRIBYL, Douglas W. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. Geoderma, v. 156, n. 3-4, p. 75-83, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003.

REY, A.; PEGORARO, E.; OYONARTE, C. *et al.* Impact of land degradation on soil respiration in a steppe (Stipa tenacissima L.) semi-arid ecosystem in the SE of Spain. Soil Biology and Biochemistry, v. 43, n. 2, p. 393-403, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.11.007.

SEAQUIST, J. W.; OLSSON, L.; ARDÖ, J. A remote sensing-based primary production model for grassland biomes. Ecological Modelling, v. 169, n. 1, p. 131-155, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00267-9.

SELLERS, P. J.; MEESON, B. W.; HALL, F. G. *et al.* Remote sensing of the land surface for studies of global change: models – algorithms – experiments. Remote Sensing of Environment, v. 51, n. 1, p. 3-26, 1995. DOI: https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00061-Q.

SERBIN, Guy; DAUGHTRY, Craig S. T.; HUNT, E. Raymond *et al.* Effect of soil spectral properties on remote sensing of crop residue cover. Soil Science Society of America Journal, v. 73, n. 5, p. 1545-1558, 2009. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0311.

SHENG, Hao; YANG, Yusheng; YANG, Zhijie *et al.* The dynamic response of soil respiration to land-use changes in subtropical China. Global Change Biology, v. 16, n. 3, p. 1107-1121, 2010. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01988.x.

SILVA, Luciana da Luz. Modelagem do carbono orgânico no solo por espectrorradiometria de reflectância em Morro do Chapéu – BA. 2020. Dissertação (Mestrado em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2020.

SMITH, Pete. Soils and climate change. Current Opinion in Environmental Sustainability, v. 4, n. 5, p. 539-544, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.06.005.

SOUZA, Carlos M.; SHIMBO, Julia Z.; ROSA, Marcos R. *et al.* Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. Remote Sensing, v. 12, n. 17, 2735, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/rs12172735.

SPINAK, Ernesto. Diccionario enciclopédico de bibliometría, cienciometría e informetría. Montevideo: Unesco, 1996. 245 p.

STEYAERT, Louis T.; KNOX, Robert G. Reconstructed historical land cover and biophysical parameters for studies of land-atmosphere interactions within the eastern United States. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 113, n. D2, 2008. DOI: https://doi.org/10.1029/2006jd008277.

TAMIMINIA, Haifa; SALEHI, Bahram; MAHDIANPARI, Masoud *et al.* Google Earth Engine for geo-big data applications: a meta-analysis and systematic review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 164, p. 152-170, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001.

TRUMBORE, Susan; CAMARGO, Plínio Barbosa de. Soil carbon dynamics. In: KELLER, Michael; BUSTAMANTE, Mercedes; GASH, John; DIAS, Pedro Silva (ed.). Amazonia and global change. Washington, DC: American Geophysical Union, 2009. p. 451-462. (Geophysical Monograph Series, 186). DOI: https://doi.org/10.1029/2008GM000741.

UNFCCC – UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Kyoto: United Nations, 1998. Disponível em: https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf. Acesso em: 13 nov. 2026.

VAN ECK, Nees Jan; WALTMAN, Ludo. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics, v. 84, n. 2, p. 523-538, 2010. DOI: https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3.

VASCONCELOS, Rodrigo N.; LIMA, André T. Cunha; LENTINI, Carlos A. D. *et al.* Oil spill detection and mapping: a 50-year bibliometric analysis. Remote Sensing, v. 12, n. 21, 3647, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/rs12213647.

VAUDOUR, Emmanuelle; GHOLIZADEH, Asa; CASTALDI, Fabio *et al.* Satellite imagery to map topsoil organic carbon content over cultivated areas: an overview. Remote Sensing, v. 14, n. 12, 2917, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/rs14122917.

VERA-BACETA, Miguel-Angel; THELWALL, Michael; KOUSHA, Kayvan. Web of Science and Scopus language coverage. Scientometrics, v. 121, n. 3, p. 1803-1813, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s11192-019-03264-z.

VICHARNAKORN, Phutchard; SHRESTHA, Rajendra P.; NAGAI, Masahiko *et al.* Carbon stock assessment using remote sensing and forest inventory data in Savannakhet, Lao PDR. Remote Sensing, v. 6, n. 6, p. 5452-5479, 2014. DOI: https://doi.org/10.3390/rs6065452.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; BEHRENS, T.; BEN-DOR, E. *et al.* A global spectral library to characterize the world's soil. Earth-Science Reviews, v. 155, p. 198-230, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.012.

WADOUX, Alexandre M. J.-C.; MINASNY, Budiman; MCBRATNEY, Alex B. Machine learning for digital soil mapping: applications, challenges and suggested solutions. Earth-Science Reviews, v. 210, 103359, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103359.

WALTMAN, Ludo; VAN ECK, Nees Jan; NOYONS, Ed C. M. A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. Journal of Informetrics, v. 4, n. 4, p. 629-635, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.07.002.

WANG, Bin; WATERS, Cathy; ORGILL, Susan *et al.* Estimating soil organic carbon stocks using different modelling techniques in the semi-arid rangelands of eastern Australia. Ecological Indicators, v. 88, p. 425-438, 2018a. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.049.

WANG, Shuai; ADHIKARI, Kabindra; WANG, Qiubing *et al.* Role of environmental variables in the spatial distribution of soil carbon (C), nitrogen (N), and C:N ratio from the northeastern coastal agroecosystems in China. Ecological Indicators, v. 84, p. 263-272, 2018b. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.046.

WULDER, Michael A.; MASEK, Jeffrey G.; COHEN, Warren B. *et al.* Opening the archive: how free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. Remote Sensing of Environment, v. 122, p. 2-10, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.010.

XIAO, Jingfeng; CHEVALLIER, Frederic; GOMEZ, Cecile *et al.* Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: a review of advances over 50 years. Remote Sensing of Environment, v. 233, 111383, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111383.

XIN, Zhongbao; QIN, Yunbin; YU, Xinxiao. Spatial variability in soil organic carbon and its influencing factors in a hilly watershed of the Loess Plateau, China. Catena, v. 137, p. 660-669, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.028.

YU, Deyong; SHI, Peijun; SHAO, Hongbo *et al.* Modelling net primary productivity of terrestrial ecosystems in East Asia based on an improved CASA ecosystem model. International Journal of Remote Sensing, v. 30, n. 18, p. 4851-4866, 2009. DOI: https://doi.org/10.1080/01431160802680552.

YUAN, Wenping; LIU, Shuguang; ZHOU, Guangsheng *et al.* Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes. Agricultural and Forest Meteorology, v. 143, n. 3-4, p. 189-207, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.001.

ZHANG, Chao; LIU, Guobin; XUE, Sha *et al.* Rhizosphere soil microbial activity under different vegetation types on the Loess Plateau, China. Geoderma, v. 161, n. 3-4, p. 115-125, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.003.

ZHANG, Hongyue; HUANG, Mingrui; QING, Xiuling *et al.* Bibliometric analysis of global remote sensing research during 2010–2015. ISPRS International Journal of Geo-Information, v. 6, n. 11, 332, 2017. DOI: https://doi.org/10.3390/ijgi6110332.

ZUPIC, Ivan; ČATER, Tomaž. Bibliometric methods in management and organization. Organizational Research Methods, v. 18, n. 3, p. 429-472, 2015. DOI: https://doi.org/10.1177/1094428114562629.