

Documentos

198

Campinas, SP / 2025

Produção científica sobre tecnologias
da indústria 4.0 na agricultura,
com ênfase em grãos

OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

9

INDÚSTRIA,
INOVAÇÃO E
INFRAESTRUTURA



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agricultura Digital
Ministério da Agricultura e Pecuária***

e-ISSN 2764-2488

Documentos 198

Novembro, 2025

**Produção científica sobre tecnologias
da indústria 4.0 na agricultura,
com ênfase em grãos**

Maria Angelica de Andrade Leite

Claudia De Mori

Milena Ambrosio Telles

Ivo Pierozzi Junior

Maria de Cléofas Faggion Alencar

Embrapa Agricultura Digital

Campinas, SP

2025

Embrapa Agricultura Digital

Av. Dr. André Tosello, 209 -

Cidade Universitária

Campinas, SP, 13083-886

www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Júlio Esquerdo

Secretário-executivo

Sônia Ternes

Membros

Adauto Luiz Mancini

Alan Massaru Nakai

Carla Cristiane Osawa

Geraldo Magela de Almeida Cançado

Graziella Galinari

Ana ErikJoice Machado Bariani

Juliana de Carvalho Teixeira Yassitepe,

Luiz Manoel Silva Cunha

Magda Cruciol

Paula Regina Kuser Falcão

Revisão de texto

Graziella Galinari

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Giulia Mizuno e Magda Cruciol

Foto da capa

Paulo Kurtz

R. R. Rufino

Alcides Okubo Filho

Sebstião José de Araújo

Magda Cruciol

Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**Embrapa Agricultura Digital**

Produção científica sobre tecnologias da indústria 4.0 na agricultura, com ênfase em grãos : Maria Angelica de Andrade Leite ... [et al.]. – Campinas : Embrapa Agricultura Digital, 2025.

PDF (48 p.) : il. color. – (Documentos / Embrapa Agricultura Digital, e-ISSN 2764-2488 ; 198)

1. Pesquisa. 2. Tecnologias 4IR. 3. Soja. 4. Milho. 5. Arroz. 6. Trigo. 7. Feijão. I. Leite, Maria Angelicade Andrade. II. Embrapa Agricultura Digital. III. Série.

CDD (21. ed.) 630.74

Autores

Maria Angelica de Andrade Leite

Engenheira Civil, doutora em Engenharia de Computação, pesquisadora da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP.

Claudia De Mori

Agrônoma, doutora em Engenharia de Produção, pesquisadora da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP

Milena Ambrosio Telles

Licenciada em Letras, doutora em Ciência da Informação, analista da Assessoria de Estratégia da Embrapa, Brasília, DF

Ivo Pierozzi Junior

Biólogo, doutor em Ecologia, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Maria de Cléofas Faggion Alencar

Bibliotecária, doutora em Educação, analista da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

Apresentação

Na agricultura, o uso de tecnologias da Indústria 4.0 (ou 4IR, de *Fourth Industrial Revolution*) levou ao surgimento da agricultura digital, que está transformando o setor ao promover práticas mais eficientes, sustentáveis e rentáveis. As principais tecnologias associadas à 4IR incluem: inteligência artificial, internet das coisas (IoT), robótica avançada, *Big Data* e análise de dados, sensores inteligentes, rastreabilidade, computação em nuvem, realidade aumentada e realidade virtual. A integração das tecnologias 4IR aliadas à conectividade, à biotecnologia e à nanotecnologia, está revolucionando a forma como os alimentos, fibras e bioenergia são produzidos, aumentando a produtividade, a eficiência e a sustentabilidade das atividades agrícolas.

Essas tecnologias possibilitam enfrentar, de forma mais eficaz, desafios como as mudanças climáticas, a escassez de recursos e o aumento da demanda global por alimentos funcionais, seguros e saudáveis. Além disso, ajudam os agricultores a monitorar, planejar e otimizar cada aspecto do ciclo de produção, desde a semeadura até a colheita, aperfeiçoando processos, reduzindo desperdícios e melhorando a tomada de decisão.

Este trabalho teve como objetivo analisar quanti-qualitativamente a produção científica internacional relacionada a tecnologias 4IR na atividade de grãos, especificamente nas culturas de soja, milho, arroz e feijão, por meio da modelagem e visualização de domínio do conhecimento, utilizando a base de dados da Web of Science (WoS) e o software de visualização de paisagens científicas VOSviewer.

Stanley Robson de Medeiros Oliveira
Chefe-Geral da Embrapa Agricultura Digital

Sumário

Introdução	9
Busca na Web of Science	10
Software VOSViewer	11
Panorama da produção científica na área de tecnologias 4IR na produção de grãos	12
Considerações finais	42
Referências	47

Introdução

As tecnologias da Quarta Revolução Industrial (ou 4IR, de *Fourth Industrial Revolution*), referem-se a um conjunto de inovações que estão transformando a sociedade, a economia e o mercado de trabalho. Essa revolução caracteriza-se pela convergência de tecnologias físicas, digitais e biológicas. As principais tecnologias associadas à 4IR incluem: inteligência artificial, internet das coisas (IoT), robótica avançada, *Big Data* e análise de dados, sensores inteligentes, rastreabilidade, computação em nuvem, realidade aumentada e realidade virtual, além de biotecnologia, genômica e nanotecnologia. Essas tecnologias, aliadas à conectividade, estão promovendo a transformação digital em todos os setores. Ela vai além da mera digitalização de processos existentes; implica uma reestruturação fundamental de como as organizações operam, entregam valor e se adaptam a um ambiente em rápida mudança. (What [...], 2022).

Na agricultura, o uso de tecnologias 4IR levou ao surgimento da agricultura digital, que está transformando o setor ao promover práticas mais eficientes, sustentáveis e rentáveis. Essas tecnologias ajudam agricultores a monitorar, planejar e otimizar cada aspecto do ciclo de produção, desde a semeadura até a colheita, aperfeiçoando processos, reduzindo desperdícios e melhorando a tomada de decisão. Estão permitindo que os agricultores enfrentem desafios como mudanças climáticas, escassez de recursos e aumento da demanda global por alimentos funcionais, seguros e saudáveis de maneira mais eficaz. (Massruhá et al., 2020, 2023).

Este trabalho teve como objetivo identificar e mensurar o nível de produção científica associado ao uso de tecnologias da Quarta Revolução Industrial (4IR) no setor de grãos, um segmento estratégico das *commodities* que contribui de forma significativa para a balança comercial brasileira. O foco esteve nas culturas de soja, milho, arroz e feijão, por meio da modelagem e visualização do domínio do conhecimento, utilizando a base de dados *Web of Science* (WoS) (Clarivate, 2024) e o software VOSviewer (Leiden University, 2024) para

a construção e análise de redes bibliométricas. Espera-se que o levantamento da literatura científica proporcione uma visão abrangente sobre a atuação de grupos de pesquisa em diferentes países no uso das tecnologias 4IR no setor de grãos, permitindo que especialistas identifiquem tendências em pesquisa científica e no desenvolvimento tecnológico em curso. Nesse contexto, o estudo contribui para o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9 — “Indústria, Inovação e Infraestrutura” — especialmente em sua meta 9.5, ao disponibilizar informações qualificadas que podem subsidiar ações voltadas à pesquisa e à inovação.

Neste processo, buscou-se compreender como tem se orientado estas produções científicas e qual seu alcance. As publicações recuperadas foram analisadas sob os aspectos: 1) número de publicações e citações; 2) países de origem; 3) instituições envolvidas nas publicações; 4) áreas de conhecimento; 5) principais periódicos; 6) ocorrência e agrupamento de termos; e 7) termos relacionados às tecnologias 4IR.

Busca na Web of Science

A coleta dos metadados das publicações relacionadas à temática, utilizando a base *Web of Science* (Clarivate, 2024), foi realizada no dia 21 de julho de 2022. A Tabela 1 apresenta a expressão de busca (palavras-chave) empregada, bem como as delimitações de áreas de pesquisa (34 áreas). Não houve delimitação em termos de recorte temporal ou restrições de idioma ou tipo de documento.

Foi utilizada uma expressão de busca ampla, contendo as frases e/ou palavras que remetiam a assuntos relacionados à transformação digital na agricultura de modo geral, com termos como: agricultura digital, agricultura de precisão, agricultura inteligente, dentre outros. A busca também focou nos grãos de interesse, ou seja, milho, soja, arroz e feijão. A expectativa de tal expressão de busca foi de recuperar publicações associadas às tecnologias 4IR nas culturas de grãos especificadas. Com relação às áreas de pesquisa, focou-se aquelas

relativas tanto a disciplinas associadas com a transformação digital quanto às associadas à biologia e à agricultura com intuito de recuperar publicações mais direcionadas ao interesse dos temas relacionados ao trabalho.

Tabela 1. Delimitação da pesquisa na *Web of Science*.

Expressão de busca	Áreas de pesquisa
TS = ((<i>"Digital Agricult**"</i> or <i>"Precision Agricult**"</i> or <i>"Smart Agricult**"</i> or <i>"Intelligent Agricult**"</i> or <i>"Digital Farm**"</i> or <i>"Precision Farm**"</i> or <i>"Smart Farm**"</i> or <i>"Intelligent Farm**"</i> or <i>"Digital Rural"</i> or <i>"Smart Rural"</i> or <i>"Intelligent Rural"</i> or <i>"Precision crop production"</i> or <i>"Smart crop production"</i> or <i>"Precision tillage"</i> or <i>"Smart tillage"</i> or <i>"Agricult* 4.0"</i> or <i>"Agricult* 5.0"</i>) AND (soy OR soybean OR soya OR paddy OR rice OR corn OR maize OR bean)))	<i>Agriculture, Automation Control Systems, Biophysics, Business Economics, Computer Science, Development Studies, Electrochemistry, Engineering, Entomology, Environmental Sciences Ecology, Food Science Technology, Forestry, Imaging Science Photographic Technology, Instruments Instrumentation, Marine Freshwater Biology, Materials Science, Mathematical Computational Biology, Meteorology Atmospheric Sciences, Microbiology, Operations Research Management Science, Optics, Physical Geography, Physics, Physiology, Plant Sciences, Remote Sensing, Robotics, Science Technology Other Topics, Spectroscopy, Telecommunications, Toxicology, Veterinary Sciences, Virology, Water Resources.</i>

Software VOSViewer

A busca na base *Web of Science* retornou um conjunto de 1.811 publicações, representadas por seus metadados, contendo as informações: título da publicação, autores, palavras-chave, sumário, veículo de publicação, ano, língua e referências bibliográficas. O conjunto de metadados das publicações retornadas foi lido pelo software VOSviewer, que é uma ferramenta usada para criar mapas baseados em dados de rede e para visualizar e explorar esses resultados, chamados pelos desenvolvedores de paisagens bibliográficas. Pode ser

usado para construir redes de publicações científicas, revistas científicas, pesquisadores, organizações de pesquisa, países, palavras-chave ou termos. Os itens, nos mapas, são os objetos de interesse. Eles podem ser, por exemplo, países, instituições, pesquisadores ou termos. E podem ser conectados por coautoria, coocorrência, citação, acoplamento bibliográfico ou cocitação. Essa conexão é representada por um link entre os itens.

Cada link possui uma força, representada por um valor numérico positivo. Quanto maior esse valor, mais forte será o vínculo. A força de um link pode, por exemplo, indicar o número de referências citadas que duas publicações têm em comum (no caso de links de acoplamento bibliográfico), o número de publicações de coautoria de dois pesquisadores (no caso de links de coautoria), ou o número de publicações em que dois termos ocorrem juntos (no caso de links de coocorrência).

Os itens podem ser agrupados em *clusters*. Um *cluster* representa um grupo de itens que estão mais fortemente relacionados entre si, com base em critérios de coocorrência ou proximidade. A ferramenta usa técnicas de análise de rede para identificar essas conexões, agrupando elementos que têm uma alta frequência de associação ou similaridade.

No decorrer do documento, vários dos aspectos analisados são apresentados como mapas de análise de ocorrência e coocorrência de termos. Além disso, os termos mais relevantes, nas publicações recuperadas, são agrupados em *clusters* que denotam a força ou o grau em que coocorrem nas publicações.

Panorama da produção científica na área de tecnologias 4IR na produção de grãos

A seguir, são apresentados os tópicos nos quais as publicações foram analisadas.

Número de publicações e citações

A consulta com base nos parâmetros estabelecidos identificou um total de 1.811 publicações indexadas na biblioteca principal da *Web of Science*, abordando a questão de tecnologias 4IR na cultura de grãos. O período de publicação de tais documentos abrangeu os anos de 1995 a 2022. De acordo com os resultados gerados na base da WoS, verificou-se uma soma total de 38.073 citações, uma média de 21,0 citações por publicação. A Figura 1 ilustra o número de publicações e de citações por ano considerando as recuperadas pela expressão de busca. Os artigos com maior número de citações encontram-se na Tabela 2.

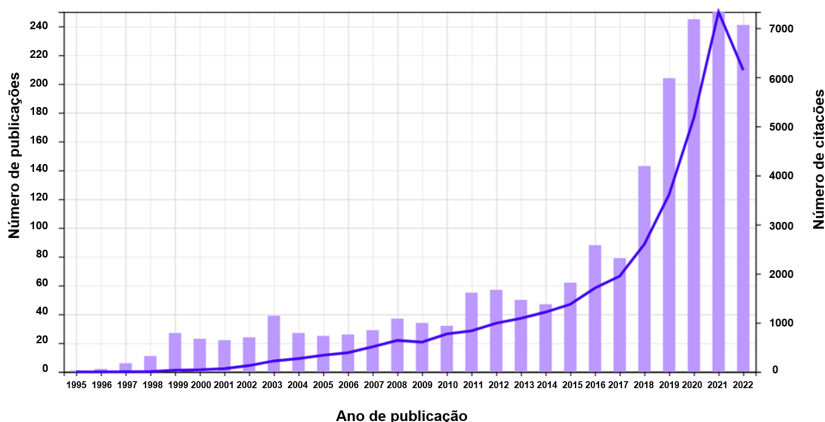


Figura 1. Evolução do número de publicações e de citações.

Segundo a Figura 1, observa-se um crescimento exponencial de publicações e citações a partir do fim da década 2010, com uma queda de 2021 para 2022 pelo fato de a pesquisa ter sido realizada no mês de julho de 2022. Até o ano de 2000, a média foi de 11,7 publicações por ano. No período de 2001/2010, a média foi de 31,8 publicações por ano; de 2011/2020, esta média foi de 101,8 publicações por ano; e no biênio 2021/2022, a média foi de 243,0 publicações por ano. O número de publicações do triênio 2020/2022 foi de 729, o que corresponde a 40,3% do conjunto de documentos recuperados na

busca. Esse crescimento demonstra o quanto o tema tem ganhado relevância ao longo do tempo, em especial nos últimos três anos.

Tabela 2. Artigos com maior número de citações dentre o conjunto recuperado na pesquisa na WoS.

Artigos	Ano de publicação	Número de citações
HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; PATTEY, E.; ZARCO-TEJADA, P. J.; STRACHAN, I. B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture. <i>Remote Sensing of Environment</i> , v. 90, n. 3, p. 337-352, Apr. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.01310 .	2004	1.488
HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; TREMBLAY, N.; ZARCO-TEJADA, P. J.; DEXTRAZE, L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. <i>Remote Sensing of Environment</i> , v. 81, n. 2-3, p. 416-426, 2002. DOI: https://www.doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00018-4 .	2002	1.134
CASSMAN, K. G. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. <i>Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America</i> , v. 96, n. 11, p. 5952-5959, May 1999. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.96.11.5952 .	1999	889
LIAKOS, K. G.; BUSATO, P.; MOSHOU, D.; PEARSON, S.; BOCHTIS, D. Machine learning in agriculture: a review. <i>Sensors</i> , v. 18, n. 8, 2674, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/s18082674 .	2018	685

Continua...

Tabela 2. Continuação

GITELSON, A. A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. Journal of Plant Physiology , v. 161, n. 2, p. 165-173, 2004. DOI: https://doi.org/10.1078/0176-1617-01176 .	2004	650
WU, C.; NIU, Z.; TANG, Q.; HUANG, W. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. Agricultural and Forest Meteorology , v. 148, n. 8-9, p. 1230-1241, July 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agrfor-met.2008.03.005 .	2008	474
BENDIG, J.; BOLTON, A.; BENNERTZ, S.; BROSCHEIT, J.; EICHFUSS, S.; BARETH, G. Estimating biomass of barley using Crop Surface Models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. Remote Sensing , v. 6, n. 11, p. 10395-10412, 2014. DOI: https://doi.org/10.3390/rs6110395 .	2014	385
JACQUEMOUD, S.; BACOUR, C.; POILVE, H.; FRANGI, J. P. Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance: direct and inverse mode. (2000). Remote Sensing of Environment , v. 74, n. 3, p. 471-481, Dec. 2000. DOI: https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00139-5 .	2000	309
MIAO, Y.; STEWART, B. A.; ZHANG, F. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China. A review. Agronomy for Sustainable Development , v. 31, n. 12, p. 397-414, 2011. DOI: https://doi.org/10.1051/agro/2010034 .	2011	304

Continua...

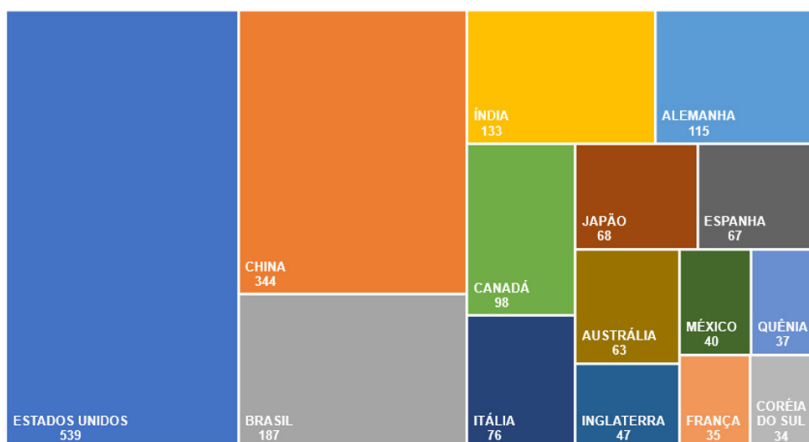
Tabela 2. Continuação

PATRICIO, D. I.; RIEDER, R. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: a systematic review. Computers and Electronics in Agriculture , v.153, p. 69-81, Oct. 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.001 .	2018	272
---	------	-----

Países de origem

Na base de dados *Web of Science*, o país de origem de uma publicação é determinado com base na afiliação institucional dos autores. O critério principal consiste no(s) endereço(s) institucional(is) fornecido(s) pelos autores no momento da submissão do artigo. Se um artigo tem autores de diferentes países, a publicação será atribuída a todos os países envolvidos.

Os documentos deste conjunto são originários de 103 países com destaque para os Estados Unidos, China, Brasil, Índia, Alemanha e Canadá que juntos totalizam participação em 78% do conjunto de publicações. A Figura 2 apresenta os 15 países com o maior número de publicações.

**Figura 2.** Número de publicações nos principais países origem.

A análise da rede de coautoria baseado no país de origem, com pelo menos uma publicação envolvendo o país, mostra um mapa bibliométrico com 15 *clusters*, considerando a ocorrência de publicação conjunta entre os países que possuem mais força de links na rede, ou seja, denotam uma maior interação contínua de pesquisas conjuntas e que geraram as publicações (Figura 3).

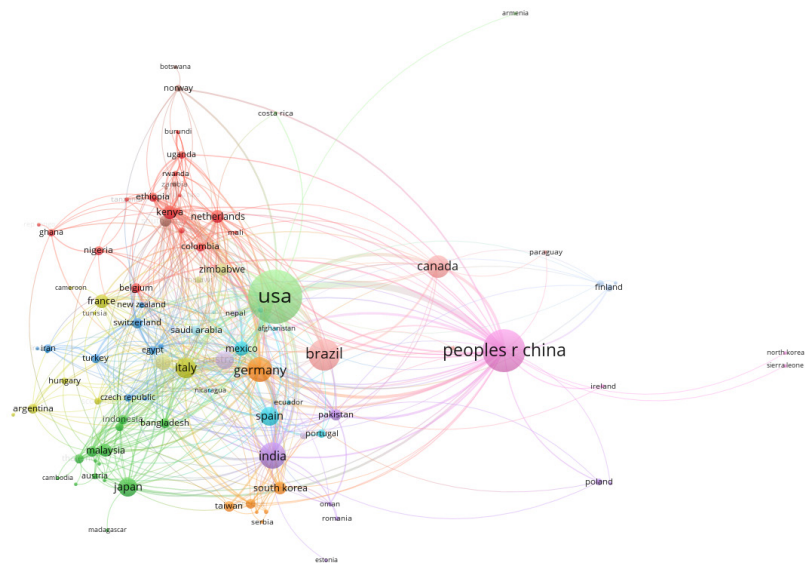


Figura 3. Rede de coautoria por países de origem.

1	Bélgica, Burkina, Faso Burundi, Colômbia, República Democrática do Congo, Etiópia, Gana, Quênia, Mali, Marrocos, Holanda, Nigéria, Ruanda, Suécia, Tanzânia, Uganda	2	Áustria, Bangladesh, Camboja, Indonésia, Japão, Laos, Líbia, Madagáscar, Malásia, Mianmar, Filipinas, Cingapura, Tailândia, Vietnã,	3	República Checa, Egito, Fiji, Irã, Iraque, Nova Zelândia, Eslováquia, Sri Lanka, Suíça, Peru
4	Argentina, Camarões, França, Hungria, Itália, Escócia, Tunísia, Uruguai	5	Estônia, Índia, Omã, Paquistão, Polónia, Romênia, Ucrânia	6	Afganistão, Equador, México, Nicarágua, Portugal, Espanha País de Gales
7	Chipre, Alemanha, Grécia, Rússia, Sérvia, Coreia do Sul, Taiwan	8	Botsuana, Noruega, África do Sul, Sudão, Zâmbia,	9	Irlanda, Coreia do Norte, República Popular da China, Serra Leoa
10	Brasil, Canadá, Chile, Paraguai	11	Arménia, Costa Rica, USA	12	Dinamarca, Finlândia, Eslovénia
13	Inglaterra, Maláui, Zimbábue	14	Australia, Israel, Nepal	15	Luxemburgo, Arábia Saudita

Figura 4. Cluster de países.

Os países de maior destaque são Estados Unidos, China, Brasil, Índia, Alemanha e Canadá. A Figura 4 apresenta os *clusters* formados mediante o uso do software VOSviewer. O Brasil tem 187 publicações e pertence ao *cluster* formado por Brasil, Canadá, Chile e Paraguai.

Instituições envolvidas nas publicações

Um total de 1.870 instituições estão envolvidas neste conjunto de publicações. A Figura 5 ilustra as 15 principais organizações. As instituições brasileiras com maior número de publicações neste conjunto foram: Universidade de Santa Maria (33 publicações), Universidade Federal de Viçosa (27), Embrapa (26), Universidade Estadual Paulista (26), Universidade de São Paulo (22), Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (21), Universidade Estadual do Oeste do Paraná (20) e Universidade Tecnológica Federal do Paraná (18). Ao todo, 84 instituições brasileiras são elencadas.

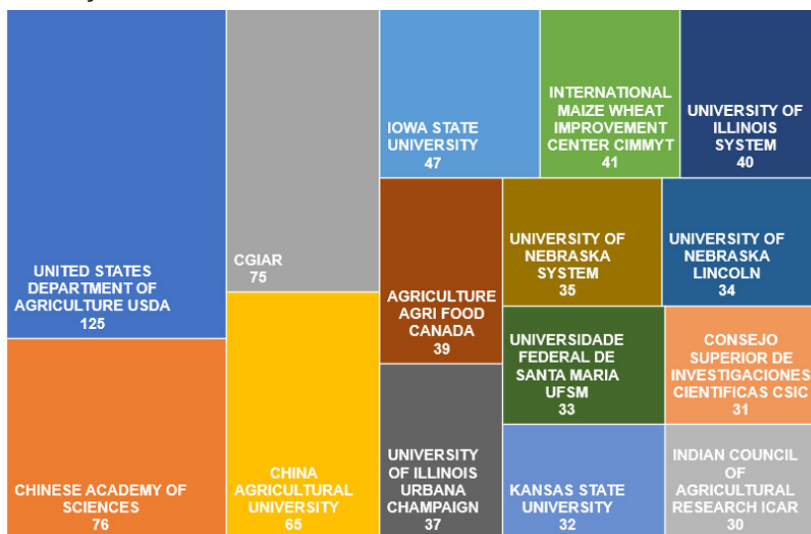


Figura 5. Número de publicações nas principais instituições de origem dos autores.

A análise da rede de coautoria baseada na instituição de origem mostra um mapa bibliométrico na Figura 6. As dez instituições com maior força de link na rede, ou seja, com maior ocorrência de coautoria nas publicações, foram: Agricultural Research Service – US Department of Agriculture (ARS USDA), Chinese Academy of Agricultural Sciences, China Agricultural University, Kansas State University, University of Chinese Academy of Sciences, University of Illinois, Agriculture and Agri-Food Canada, Ohio State University, University of Nebraska e International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT).

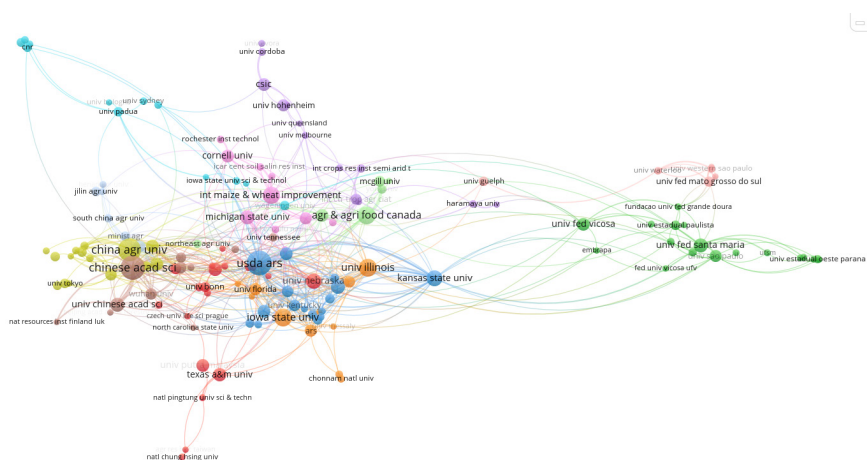


Figura 6. Rede de coautoria por instituições.

O conjunto de publicações teve autoria de 7.244 autores, sendo que os autores com maior número de publicações no conjunto de dados da busca foram: Yuxin Miao - University of Minnesota / Estados Unidos; Mangi Lal Jat - CIMMYT / Índia; Christian Thierfelder - CIMMYT / Zimbabwe; Yan Zhu - University of California, Riverside / Estados Unidos; Weixing Cao - National Engineering and Technology Center for Information Agriculture (NETCIA) / China; e Telmo Jorge Carneiro Amado – Universidade de Santa Maria / Brasil. A porcentagem de participação de autores foi igual ou menor que 1%

demonstrando que ainda não existe um grupo dominante na pesquisa deste tema, sendo que a pesquisa tem sido feita por vários autores (grupos de pesquisa) em diferentes países.

Áreas de conhecimento

As publicações integram 54 áreas de conhecimento. As 15 áreas de conhecimento com o maior número de publicações associadas estão representadas na Figura 7.

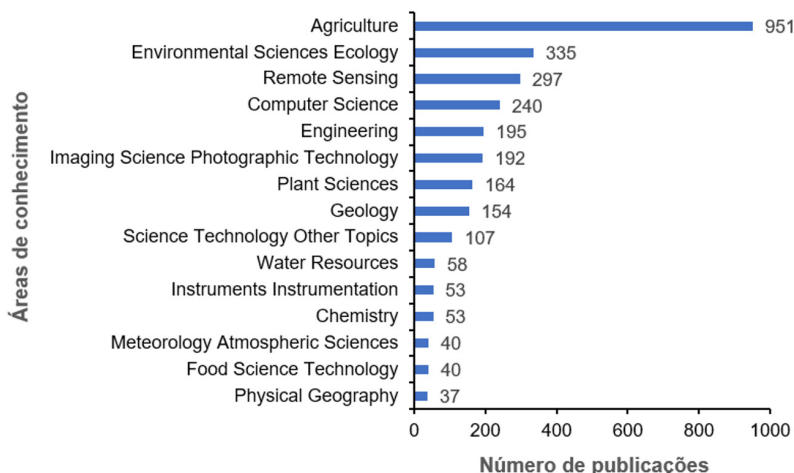


Figura 7. Número de publicações nas principais áreas de conhecimento.

Principais periódicos

No que se refere aos principais meios de publicação, foram apresentados um total de 632 tipos (periódicos e anais de congresso). Dentre os periódicos, 410 continham uma publicação e 40 deles totalizaram 50,0% do conjunto de publicações da pesquisa, o que denota concentração do tema em um conjunto específico de periódicos.

A Tabela 3 apresenta a lista dos periódicos com maior número de documentos da pesquisa.

Tabela 3. Lista dos 20 periódicos com maior registro de artigos da amostra.

Periódico	Número de documentos	%
Remote Sensing	95	5,0%
Computers and Electronics in Agriculture	90	4,8%
Precision Agriculture	71	3,8%
Agronomy-Basel	44	2,3%
Agronomy Journal	36	1,9%
Field Crops Research	31	1,6%
Agriculture-Basel	30	1,6%
Sensors	30	1,6%
Sustainability	27	1,4%
Transactions of the Asae	26	1,4%
European Journal of Agronomy	23	1,2%
Applied Engineering in Agriculture	22	1,2%
Transactions of the Asabe	21	1,1%
Engenharia Agrícola	19	1,0%
Frontiers in Plant Science	19	1,0%
Remote Sensing of Environment	18	1,0%
Soil & Tillage Research	18	1,0%
Agricultural Systems	17	0,9%
Agricultural Water Management	16	0,8%
International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation	16	0,8%

Ocorrência e agrupamento de termos¹

O corpus formado pela pesquisa foi composto por 6.477 termos com uma ocorrência. Na Tabela 4 pode-se verificar quais foram os 50 termos de maior ocorrência e seu respectivo valor do indicador de força de rede (*total link strength*), o que denota sua maior coocorrência com os demais termos. Neste grupo observa-se a presença de termos ligados às expressões “*precision*” e “*smart*” (*precision agriculture*, *precision farming*, *climate-smart agriculture*), sendo que os termos mais vinculados a grupos tecnológicos são: *remote sensing*, *spatial variability*, *machine learning*, UAV (*Unmanned aerial Vehicle*) e *deep learning*. O termo “*precision agriculture*” foi o mais frequente, com 685 ocorrências. Por outro lado, o termo “*digital agriculture*” ocorreu 18 vezes e, por essa razão, não consta na tabela. Isto demonstra que este termo denota uma nova área de pesquisa que está em evolução e que ainda está sendo consolidada na literatura.

Em relação aos segmentos agrícolas investigados, há prevalência de palavras associadas às culturas milho, trigo e arroz e termos relacionados à colheita, rendimento, produtividade, segurança alimentar, solo, fertilizante e índice de vegetação, o que mostra que estes temas são os focos das pesquisas que têm sido feitas no que se refere à transformação digital na área de grãos.

⁽¹⁾ Neste trabalho, optamos por tratar de “termos” as palavras envolvidas no trabalho de forma genérica. Tecnicamente, um termo é uma palavra associada a um conceito, num contexto de uso específico, ou seja, considera-se um termo aquela palavra validada por um especialista de domínio (ou consagrada na literatura) como referente a um conceito pertencente àquela área. Por isso, o trabalho de mapeamento conceitual, especialmente em áreas emergentes como as do 4IR, proporcionam uma análise aprofundada de quais conceitos estão surgindo e como eles estão sendo designados, ou seja, que termos têm sido usados para referenciá-los.

Tabela 4. Lista dos 50 termos de maior ocorrência no conjunto de publicações.

Ordem	Palavra-chave	Ocorrência	Peso “Total link strength”
1	<i>precision agriculture</i>	685	4637
2	<i>corn</i>	271	2128
3	<i>yield</i>	248	1995
4	<i>maize</i>	206	1738
5	<i>management</i>	164	1366
6	<i>nitrogen</i>	149	1232
7	<i>soil</i>	143	1110
8	<i>remote sensing</i>	139	1131
9	<i>variability</i>	139	1078
10	<i>precision farming</i>	130	765
11	<i>vegetation indexes</i>	129	1266
12	<i>spatial variability</i>	120	819
13	<i>wheat</i>	112	978
14	<i>rice</i>	107	844
15	<i>agriculture</i>	100	778
16	<i>classification</i>	98	794
17	<i>growth</i>	95	789
18	<i>reflectance</i>	94	867
19	<i>model</i>	88	731
20	<i>grain-yield</i>	84	743
21	<i>biomass</i>	80	778
22	<i>climate-smart agriculture</i>	75	591

Continua...

Tabela 4. Continuação

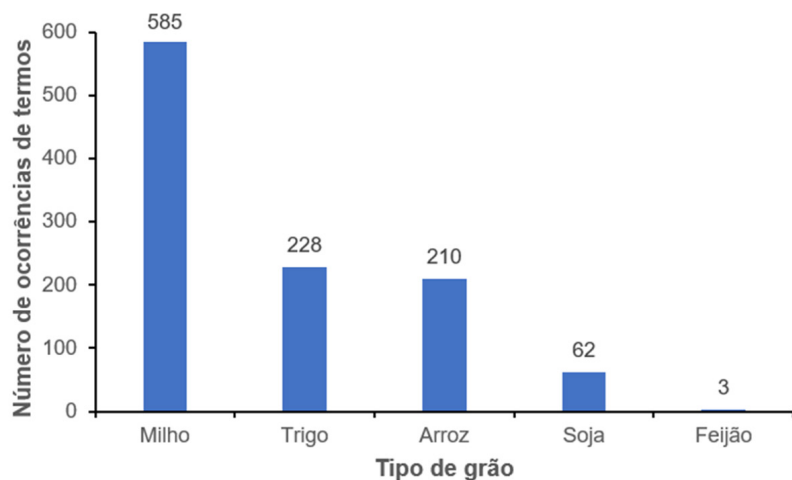
23	<i>leaf-area index</i>	73	777
24	<i>crop</i>	72	638
25	<i>chlorophyll content</i>	71	706
26	<i>systems</i>	70	584
27	<i>machine learning</i>	70	579
28	<i>system</i>	68	566
29	<i>uav</i>	67	512
30	<i>water</i>	67	568
31	<i>winter-wheat</i>	59	607
32	<i>conservation agriculture</i>	55	486
33	<i>tillage</i>	54	430
34	<i>productivity</i>	52	481
35	<i>management zones</i>	52	389
36	<i>prediction</i>	51	476
37	<i>food security</i>	50	421
38	<i>vegetation</i>	50	443
39	<i>adaptation</i>	48	398
40	<i>vegetation index</i>	48	429
41	<i>irrigation</i>	48	348
42	<i>identification</i>	48	322
43	<i>deep learning</i>	46	229
44	<i>use efficiency</i>	45	425
45	<i>ndvi</i>	45	341
46	<i>fertilizer</i>	44	367

Continua...

Tabela 4. Continuação

47	<i>field</i>	44	375
48	<i>soil properties</i>	44	344
49	<i>adoption</i>	43	359
50	<i>climate change</i>	43	325

Os números de ocorrências de termos relacionados às culturas dos grãos da pesquisa são mostrados na Figura 8.

**Figura 8.** Número de ocorrências dos termos relativos a grãos nas publicações.

Além dos grãos especificados na expressão de busca (milho, soja, arroz e feijão), a consulta retornou várias publicações relacionadas a trigo e, por isso, este cereal também foi contabilizado nas análises realizadas. Os termos registrados na análise, relacionados a cada tipo de grão, estão listados a seguir:

- Milho: *corn, corn leaves, corn production, corn yield, corn yield response, corn grain-yield, corn zea-mays, maize, maize crop, maize fields, maize production, maize yield, drought-tolerant maize, ceres-maize, ceres-maize model.*
- Arroz: *rice, rice farmers, rice farming, rice fields, rice production, rice yield, rice-wheat rotation, rice-wheat system, rice farming, rice-wheat systems, paddy, paddy field, paddy fields, paddy rice, paddy-rice.*
- Trigo: *wheat, wheat yield, winter wheat, winter-wheat, winter-wheat yield, durum wheat, rice-wheat rotation, rice-wheat system, rice-wheat systems, wheat triticum-aestivum, spring wheat.*
- Soja: *glycine max, soybean. soybean quality data, soybean yield.*
- Feijão: *snap bean.*

A partir da elaboração de mapas baseados em dados bibliográficos, abrangendo os campos de título, palavras-chave e resumo do corpus, e considerando os mil termos de maior coocorrência, foram gerados nove *clusters* (Figuras 9 e 10), que representam os conjuntos de termos/temas interligados. Os *clusters* gerados foram nomeados tomando por base os termos com maior ocorrência cujo significado representava melhor os demais termos presentes no *cluster*. Tal quantidade de *clusters* demonstra uma diversidade de abordagens relacionadas ao assunto ou tema de tecnologias 4IR em grãos. Com base no termo de maior valor indicador de força de rede e nos conjuntos de termos presentes em cada *cluster* uma descrição interpretativa é formulada a seguir.

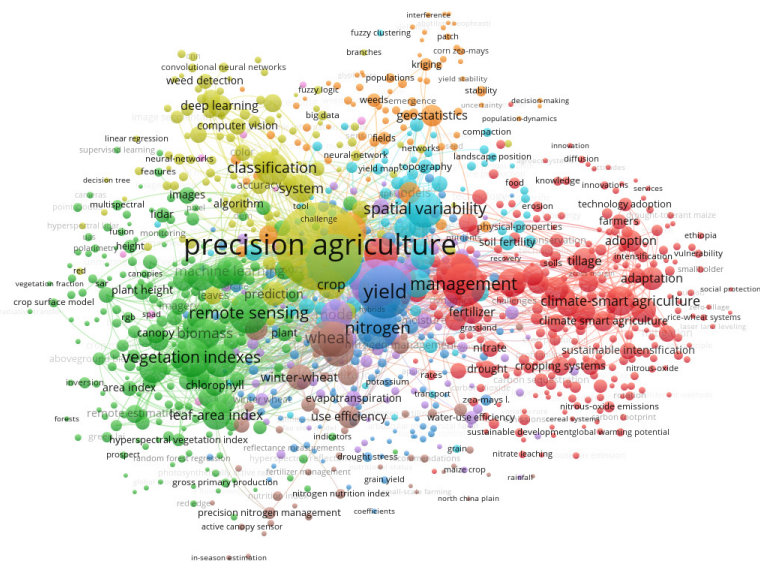


Figura 9. Mapa conceitual-terminológico com visualização da rede de termos agrupados em *clusters*. Cada *cluster* é identificado por uma cor diferente.

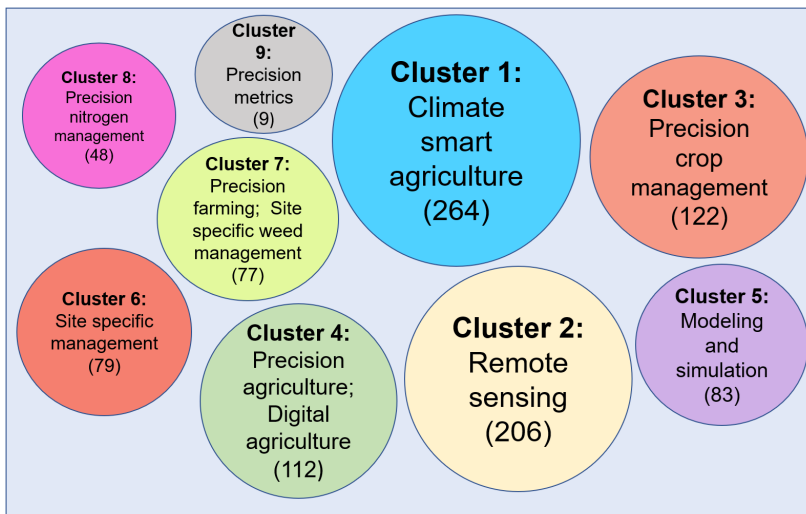


Figura 10. *Clusters* conceituais com base no corpus da pesquisa e o número de termos em cada um deles.

Os *clusters* estão descritos a seguir:

- *Cluster 1: Climate smart agriculture:* o *cluster* agregou 264 termos. Verificou-se baixa menção de termos associados às tecnologias 4IR, mas houve maior ocorrência de termos associados à agricultura de precisão e à análise de dados. No domínio agrícola, os termos estavam relacionados aos impactos das mudanças climáticas na agropecuária, à emissão de gases de efeito estufa e a conceitos, ações e práticas para mitigação destes impactos. Relativo ao segmento da produção de grãos, os termos focam em manejo e conservação do solo, adubação e fertilização, recursos naturais, grupos impactados pelas mudanças climáticas, regiões vulneráveis, ações e práticas para enfrentamento às mudanças climáticas, impacto econômico e social. Os termos relacionados especificamente às culturas que aparecem neste *cluster* são: milho, arroz, trigo, soja e canola.
- *Cluster 2: Remote sensing:* o *cluster* contempla 206 termos bastante focados em cobertura vegetal, monitoramento, mapeamento e sensoriamento e às questões tecnológicas compreendendo métricas de cobertura vegetal, equipamentos tecnológicos, satélites, tipos de dados, métodos de análise de dados e modelagem e simulação. Com relação às questões agrícolas, os termos são relativos à fertilização e detecção de estresses considerando as culturas grãos de feijão, arroz e cevada. Foi observado que os documentos também mencionaram as culturas de batata e floresta.
- *Cluster 3: Precision crop management:* o *cluster* reúne 122 termos tendo sido observada a presença de termos relacionados à agricultura digital, colheita de precisão, métricas de cobertura vegetal, tecnologias 4IR, métodos de análise de dados e modelagem e simulação. Nos temas agrícolas apareceram termos associados a adubação e fertilização, irrigação, estresses, manejo de pragas e doenças, defensivos, produtividade e melhoramento genético. Com relação às culturas de grãos,

foram encontrados termos referentes a arroz, milho, sorgo e trigo. Outras culturas também foram apontadas nos documentos recuperados, como ervilha, girassol, mostarda, cana de açúcar e tomate. A região mencionada foi a China.

- *Cluster 4: Precision agriculture; Digital Agriculture*: o *cluster* abrange 112 termos. No domínio tecnológico observou-se um foco em agricultura de precisão, inteligência artificial, métodos e análise de dados, visão computacional, equipamentos e tecnologias 4IR. No domínio agrícola, os termos estavam relacionados a manejo de pragas e doenças, práticas agrícolas e fertilização. A cultura de grão mencionada foi o milho. Outras culturas também foram apontadas como algodão, beterraba e girassol. É o *cluster* com mais ocorrências de termos relativos às tecnologias 4IR (62 termos). Uma vez que neste *cluster* várias das tecnologias listadas também são relacionadas à Agricultura Digital então este termo também foi selecionado para nomear o *cluster*.
- *Cluster 5: Modeling and simulation*: o *cluster* contabiliza 83 termos. No domínio tecnológico, estão associados a modelagem e simulação, agricultura de precisão, métricas e métodos utilizados em agricultura de precisão e métodos de análise de dados. No que se refere ao domínio da agricultura, os termos são relacionados à adubação e fertilização e à irrigação, sendo que as culturas de grãos englobam milho e trigo tendo sido relatado, também, floresta. A região citada foi a China.
- *Cluster 6: Site specific management*: possui 79 termos associados, no domínio tecnológico, à agricultura de precisão, métricas de agricultura de precisão, sensores, dados e métodos de análise de dados. Com relação ao domínio agrícola, os termos estão mais relacionados a mapas de produtividade, propriedades do solo e produtividade de grãos. As culturas citadas são milho, soja e trigo.
- *Cluster 7: Precision farming; site specific weed management*: o conjunto é composto por 77 termos relacionados à agricultura

de precisão, métodos de análise de dados, sensoriamento remoto e tecnologias 4IR. Na parte agrícola os termos estão mais associados ao manejo de ervas daninhas, defensivos agrícolas e medidas de produtividade. As culturas citadas são milho e soja.

- *Cluster 8: Precision nitrogen management*: o *cluster* abriga 48 termos relacionados à agricultura de precisão para fertilização, sensores e inteligência artificial. Na área agrícola os termos se relacionam à fertilização e nutrição de plantas, fertilização específica de nitrogênio e métricas de fertilização. Quanto às culturas agrícolas, o foco foi nas culturas de arroz, trigo e milho, sendo que a região mais citada foi a China.
- *Cluster 9: Precision metrics*: o grupo envolve nove termos e todos estão relacionados à parte tecnológica se referindo à agricultura de precisão, métricas, método de análise de dados, instrumento de medição e inteligência artificial.

Na Tabela 5, são apresentados os termos integrantes de cada *cluster*, organizados em duas categorias: 1) termos associados a conceitos relativos às tecnologias 4IR; e 2) temas relacionados à agricultura e/ou aos segmentos de grãos. Ao classificar os termos nessas duas categorias, buscou-se oferecer uma visão mais ampla dos assuntos abordados nos documentos analisados, evidenciando tanto as áreas tecnológicas quanto as práticas agrícolas e as aplicações em que essas tecnologias têm sido empregadas. O objetivo foi fornecer aos especialistas um panorama da área, permitindo que identifiquem tanto as áreas onde as soluções são tratadas na comunidade científica quanto as lacunas que podem ser exploradas por meio de novas pesquisas e inovações.

Tabela 5. *Clusters* organizados por título, número de termos e termos associados a conceitos e/ou tecnologias 4IR e temas de agricultura e tipos de culturas.

Clusters	Termos associados a conceitos e/ou tecnologias 4IR	Termos associados a temas da agricultura e tipos de culturas
Cluster 1 Climate smart agriculture 264 termos	- Climate smart agriculture: <i>climate-smart agriculture, climate smart agriculture</i> . - Agricultura de precisão: <i>site-specific fertilization, precision nutrient management, precision agriculture system</i> - Análise de dados: <i>modelling, DSSAT, propensity score matching</i>	- Mudanças climáticas e seus impactos: <i>adaptation, climate-change, drought, carbon sequestration, climate, sequestration, global warming potential, climate change adaptation, climate resilience, weather</i> - Emissão de gases de efeito estufa: <i>greenhouse-gas emissions, greenhouse gas emission, emissions, N2O, N2O emissions, nitrous-oxide, carbon-dioxide, soil carbon sequestration, methane, methane emissions, carbon balance, nitrous-oxide emissions, oxide emissions, carbon footprint, greenhouse gas risk</i> - Manejo e conservação do solo: <i>no-tillage, soil quality, soil organic carbon, land-use, conservation tillage, rotation, land, erosion, conventional tillage, nitrate leaching, minimum tillage, soil organic-matter, reduced tillage, direct seeding, agricultural soils, soil mapping, nitrification inhibitors, cover crop, subsurface drainage, row-crop field, soil testing, decomposition</i> - Adubação e fertilização do solo: <i>fertilizer, phosphorus, nitrate, nutrient management, manure, animal manure, nutrient, soil organic matter, fosfate, nitrogen-fertilizer, soil nitrate, ammonia volatilization, soil fertility management, urea, N fertilization, denitrification, cattle slurry</i> - Recursos naturais: <i>soil, water conservation, water productivity</i> .

Continua...

Tabela 5. Continuação

- Grupos impactados pelas mudanças climáticas: *smallholder farmers, farmers, smallholder agriculture, smallholder farming, gender, households*.

- Regiões vulneráveis: *Africa, Sub-saharan Africa, Southern Africa, Indo-gangetic plains, United-States, India, Bangladesh, Ghana, Zimbabwe, Ethiopia, Nepal, Punjab, Highlands, Mekong Delta*.

- Ações e práticas para enfrentamento às mudanças climáticas: *management, adoption, performance, intensification, mitigation, change adaptation, technology adoption, conservation, environment, sequestration, policy, energy efficiency, technical efficiency, residue management, eco-efficiency, crop residue, diversification, smart agricultural practices, pest management, habitat management, ecological intensification, periurban agriculture, conservation practices, seed systems, farming systems, ecosystem services, production systems, tillage systems, agroecosystems, crop-rotation, smart agricultural practices, zero-tillage*.

- Impacto econômico: *economics, rates, losses, yield gap, income, economy, cost-benefit analysis*.

- Impacto social: *poverty, poverty reduction, social protection, social networks, poverty traps*.

- Culturas de grãos: *maize production, rice production, rice-wheat system, paddy fields, rice fields, rice farmers, corn yield response, corn production, irrigated maize, drought-tolerant maize, soybeans, winter oilseed rape*.

Continua...

Tabela 5. Continuação

<i>Cluster 2</i>	- Cobertura vegetal, monitoramento, mapeamento e sensoriamento: <i>vegetation mapping, land-cover, canopy cover, cover, remote sensing, crop monitoring monitoring, crop mapping, photography.</i>	- Fertilização: <i>fertilizers, nitrogen-content, nitrogen nutrition, chemical-properties.</i> - Detecção de estresses: <i>stress detection, water-stress.</i>
Remote sensing		- Culturas de grãos: <i>snap bean, paddy rice, barley, paddy-rice, lowland rice.</i> - Outras culturas mencionadas: <i>potato, forest, forests.</i>
206 termos	- Métricas de cobertura vegetal: <i>aboveground biomass, area index, band vegetation indexes, biomass estimation, biophysical parameters, canopy chlorophyll content, canopy height, canopy reflectance, canopy temperature, chlorophyll concentration, crop height, density, difference vegetation index, fluorescence, height estimation, hyperspectral vegetation indexes, induced chlorophyll fluorescence, leaf area index, leaf chlorophyll content, leaf optical-properties, leaf-area index, light-use efficiency, meter readings, narrow-band, nitrogen concentration, nitrogen dilution curve, normalized difference vegetation index, photosynthetic capacity, photosynthetically active radiation, pigment concentrations, plant height, polarimetry, radiation-use efficiency, radiative-transfer, red edge position, red-edge, reflectance, remote estimation, spectral indices, spectral reflectance, surface reflectance, thermal imagery, vegetation fraction, vegetation index.</i> - Equipamentos tecnológicos: <i>sensors, light detection and ranging, unmanned aerial vehicle (uav), airborne, camera, drones, synthetic aperture radar (sar), multispectral câmara, vehicle, radar, unmanned aircraft systems.</i> - Satélites: <i>cubesat, landsat, landsat-8, modis, radarsat-2, rapideye, sentinel-1, sentinel-1a, sentinel-2.</i> - Tipo de dados: <i>hyperspectral data, multispectral data, point clouds, remote-sensing data, sar data, time-series.</i> - Métodos de análise de dados: <i>data fusion, fuzzy c-means, interpolation, machine learning, multivariate regression, random forest, random forest regression, supervised learning, support vector regression.</i> - Modelagem e simulação: <i>crop surface model, digital surface model, model inversion, radiative transfer model, surface models.</i>	

Continua...

Tabela 5. Continuação

<i>Cluster 3</i>	- Agricultura digital: <i>agriculture 4.0, digital agriculture</i> .	- Adubação e fertilização: <i>arbuscular mycorrhizal fungi, deficiency, dry-matter, fertigation, nitrogen, nitrogen application, nutrient deficiencies, nutrient deficiency, nutrient uptake, nutrients, potassium</i> .
Precision crop management	- Colheita de precisão: <i>Precision crop management</i> .	- Irrigação: <i>irrigation, irrigation scheduling, regulated deficit irrigation, salinity, soil water content, subsurface drip irrigation, water use</i> .
122 termos	- Métricas de cobertura vegetal: <i>blue-green fluorescence, chlorophyll fluorescence, chlorophyll meter readings, laser-induced fluorescence, near infrared, plant-growth, reflectance measurements, reflectance spectroscopy, solar radiation, spectral index, spectrometry</i> . - Tecnologias 4IR: <i>internet of things (IoT), precision phenotyping, soil moisture sensors, combine harvester, drone, agricultural robotics, artificial intelligence</i> . - Métodos de análise dados: <i>geostatistical analysis, multivariate analysis, spectral analysis</i> . - Modelagem e simulação: <i>ceres-maize model</i> .	- Estresses: <i>abiotic stress, drought stress, drought tolerance, heat stress, heavy-metals, resistance, salinity stress, salt stress</i> . - Manejo de pragas e doenças: <i>biological control, copper, disease</i> . - Defensivos: <i>chemical control, toxicity</i> . - Produtividade: <i>grain yield, growth, harvest index, high-throughput, seed yield, yield</i> . - Melhoramento genético: <i>plant breeding, genomic selection, germination, phenomics</i> . - Culturas de grãos: <i>paddy, paddy field, rice yield, cereals-maize, zeamays l., sorghum, transgenic rice, wheat triticum-aestivum</i> . - Outras culturas mencionadas: <i>pea pisum-sativum, sunflower, helianthus-annuus, sugarcane, tomato, arabidopsis-thaliana</i> . - Região: a região mencionada foi a China.

Continua...

Tabela 5. Continuação

<i>Cluster 4</i> Precision agriculture; Digital agriculture 112 termos	- Agricultura de precisão: <i>automated crop, automatic detection, automation, autonomous navigation, decision making, site-specific farming, variable-rate technology, smart farming.</i> - Inteligência artificial: <i>artificial neural network, convolutional neural network, fuzzy logic, neural network, deep learning, genetic algorithm, environmentally adaptive segmentation.</i> - Métodos de análise de dados: <i>classification, data mining, decision tree, linear regression, partial least squares regression, random forests, support vector machine, regression.</i> - Visão computacional: <i>computer vision, digital images, hough transform, image analysis, image processing, image segmentation, imaging, machine vision, object based image analysis, object detection, recognition, segmentation, semantic segmentation.</i> - Equipamentos: <i>agricultural vehicles, digital camera, hyperspectral lidar, tractor, unmanned aerial vehicles.</i> - Tecnologias 4IR: <i>robot, Big Data, Big Data analytics, internet of things.</i> - Manejo de pragas e doenças: <i>charcoal rot, herbicide application, macrophomina-phaseolina, plant-disease detection, weed, weed detection, weed identification, weed management.</i> - Práticas agrícolas: <i>water management, crop management, livestock management, irrigation management, soil management.</i> - Fertilização: <i>nitrogen content, nitrogen uptake.</i> - Culturas de grãos: <i>maize fields.</i> - Outras culturas mencionadas: <i>sugar-beet, sunflower, cotton</i>
--	---

Continua...

Tabela 5. Continuação

Cluster 5 Modeling and Simulation 83 termos	- Modelagem e simulação: <i>Agricultural Production Systems sIMulator (apsim), aquacrop model, crop model, crop modeling, decision support system, fao crop model, geographically weighted regression, simulation, simulation model, WOrld FOod Studies (wofost)</i>. - Agricultura de precisão: <i>management zone, spatial variation, spatial yield variability, temporal variability, temporal variation, variability, variable rate application, digital farming, decision support</i>. - Métricas e métodos utilizados em agricultura de precisão: <i>apparent electrical conductivity, difference water index, electrical-conductivity, evaporation, evapotranspiration, radiation, Surface Energy Balance Algorithms for Land, soil sampling, stomatal conductance, temperature, transpiration</i>. - Métodos de análise de dados: <i>boundary line analysis, eddy-covariance</i>.	- Adubação e fertilização: <i>fertility, organic matter, organic-carbon, soil nitrogen, soil nutrients, variable-rate fertilization</i>. - Irrigação: <i>deficit irrigation, drip irrigation, precision irrigation, soil water balance, water-quality, soil-water, water use efficiency, water-content</i>. - Culturas de grãos: <i>maize crop, zea mays L., spring wheat, winter-wheat yield, maize, wheat yield, winter wheat</i>. - Outras culturas mencionadas: <i>forest, forests</i> - Região abordada: <i>Planície da China (loess plateau)</i>
Cluster 6 Site specific management 79 termos	- Agricultura de precisão: <i>calibration, diffuse-reflectance spectroscopy, electromagnetic induction, Global Positioning System (gps), landscape position, near-infrared spectroscopy, proximal soil sensing, site-specific, site-specific crop management, site-specific management, software, spatial variability, spectroscopy, variable rate, geographic information system (GIS)</i>. - Métricas de agricultura de precisão: <i>apparent electrical-conductivity, bulk-density, conductivity, field-scale, penetration resistance, reflectance spectra, soil electrical-conductivity, soil spectroscopy</i>. - Sensores: <i>soil sensor, sensor</i>. - Dados: <i>database, soybean quality data</i>. - Métodos de análise de dados: <i>cluster analysis, least-squares regression, principal component analysis, spatial analysis, fuzzy clustering</i>.	- Mapas de produtividade: <i>management zones, soil properties, crop yields, soil fertility, topography, yield map, yield mapping, yield monitoring</i>. - Propriedades do solo: <i>compaction, soil compaction, soil texture, texture</i>. - Produtividade de grãos: <i>corn yield, soybean yield</i>. - Culturas de grãos: <i>corn, soybean, durum wheat</i>.

Continua...

Tabela 5. Continuação

Cluster 7 Precision farming; site specific weed management	Agricultura de precisão: <i>decision-making, precision farming, smart farm, variable-rate application, soil electrical conductivity, pulse-width modulation, site-specific weed management.</i> - Métodos de análise de dados: <i>geostatistics, kriging, cross-semivariogram, semivariogram.</i> 77 termos - Sensoriamento remoto: <i>geographic information system, maps, multispectral digital imagery, multispectral images, satellite imagery, sensing, spatial distribution, spectral indexes.</i> - Tecnologias 4IR: <i>IoT, wireless sensor networks.</i>	- Manejo de ervas daninhas: <i>abutilon-theophrasti, weeds, competition, crop/weed discrimination, integrated pest management, integrated weed management, pigweed amaranthus, weed control, weed distribution, weed-control.</i> - Defensivos agrícolas: <i>droplet deposition, glyphosate, herbicides, pesticides, spray drift.</i> - Medidas de produtividade: <i>yield loss, yield stability, yield variability.</i> - Cultura de grãos: <i>corn, zeamays l., glycine-max, soybean glycine-max.</i>
Cluster 8 Precision nitrogen management 48 termos	- Agricultura de precisão para fertilização: <i>precision nitrogen management, site-specific nitrogen management, variable rate fertilization, within-field variability.</i> - Sensores: <i>active canopy sensor, green-seeker sensor, optical sensor.</i> - Inteligência artificial: <i>neural network intelligence (nni).</i>	- Fertilização e nutrição de plantas: <i>fertilization, fertilizer management, in-season estimation, nutritional status.</i> - Fertilização específica de nitrogênio: <i>in-season nitrogen management, nitrogen fertilization, nitrogen management, nitrogen status, nitrogen status diagnosis.</i> - Métricas de fertilização considerando o nitrogênio: <i>dilution curve, leaf nitrogen, nutrition index, n status, nitrogen nutrition index, nitrogen-use efficiency, use efficiency.</i> - Produtividade: <i>corn grain-yield, grain-yield.</i> - Análise de vigor da planta: <i>chlorophyll meter, crop chlorophyll content, growth stage, growth-stages, ndvi.</i> - Culturas de grãos: <i>corn leaves, rice farming, wheat, rice, winter-wheat.</i> - Região abordada: China (<i>north china plain, sanjiang plain, northeast china</i>).
Cluster 9 Precision metrics (9 termos)	- Agricultura de precisão, tecnologia a taxa variada: <i>precision, variable rate technology.</i> - Métricas: <i>meter, soil plant analysis development, spectral radiance, variogram.</i> - Método de análise de dados: <i>spatial statistics.</i> - Instrumento de medição: <i>spectrometer.</i> - Inteligência artificial: <i>neural networks.</i>	Os termos deste <i>cluster</i> são associados apenas à parte tecnológica, não tratam de temas específicos de agricultura ou culturas.

Termos relacionados às tecnologias 4IR

Dentre os mil termos de maior coocorrência, identificou-se um conjunto de 22 termos referentes a conceitos mais gerais de aplicação das tecnologias 4IR ao universo da agropecuária, conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6. Termos referentes a conceitos mais gerais relacionados com aplicação de tecnologias 4IR

Conceitos relacionados a tecnologias 4IR	
<i>agricultural robotics</i>	<i>precision irrigation</i>
<i>agriculture 4.0</i>	<i>precision nitrogen management</i>
<i>automatic detection</i>	<i>precision nutrient management</i>
<i>climate smart agriculture</i>	<i>site specific weed management</i>
<i>digital agriculture</i>	<i>site-specific farming</i>
<i>digital farming</i>	<i>site-specific management</i>
<i>precision agriculture</i>	<i>site-specific nitrogen management</i>
<i>precision agriculture system</i>	<i>smart agricultural practices</i>
<i>precision conservation</i>	<i>smart agriculture</i>
<i>precision crop management</i>	<i>smart farm</i>
<i>precision farming</i>	<i>smart farming</i>

Complementarmente, observou-se que, dentre os mil termos, 282 termos estavam diretamente relacionados com tecnologias 4IR ou componentes associados a dispositivos de informática e/ou tecnologias digitais. A Tabela 7 apresenta uma sistematização destes termos agregados por categorias.

Tabela 7. Termos de maior coocorrência associados a tecnologias 4IR ou componentes de informática.

Categorias	Termos
Elementos e componentes de computadores, softwares e sistemas eletrônicos (6 termos)	<i>band, machine, mobile application, pulse-width modulation, software, spectrometer.</i>
Agricultura de precisão (43 termos)	<i>apparent electrical conductivity, apparent electrical-conductivity, calibration, conductivity, difference water index, diffuse-reflectance spectroscopy, dilution curve, electrical-conductivity, electromagnetic induction, harvest index, high-throughput phenotyping, near-infrared, near-infrared spectroscopy, nir, nitrogen nutrition index, nutrition index, penetration resistance, photography, pixel, precision phenotyping, proximal sensing, proximal soil sensing, radiation, reflectance spectra, site-specific, site-specific fertilization, soil electrical conductivity, soil electrical-conductivity, soil spectroscopy, spatial variability, spatial variation, spatial yield variability, spectrometry, spectroscopy, stomatal conductance, temporal variability, temporal variation, variable rate, variable rate application, variable rate fertilization, variable rate technology, variable-rate fertilization, within-field variability.</i>
Automação e robótica (6 termos)	<i>agricultural vehicles, automated crop, automatic detection, automation, autonomous navigation, robot.</i>

Continua...

Tabela 7. Continuação

Inteligência Artificial (28 termos)	<i>artificial intelligence, artificial intelligence (ai), artificial neural network, artificial neural networks, artificial neural-network, artificial neural-networks, cnn, convolutional neural network, convolutional neural networks, data mining, decision tree, decision trees, deep learning, environmentally adaptive segmentation, fuzzy c-means, fuzzy logic, genetic algorithm, machine learning, network, networks, neural network, neural networks, neural-network, neural-networks, supervised learning, support vector machine, support vector machines, svm.</i>
Internet das Coisas – IoT (5 termos)	<i>internet of things, internet of things (iot), iot, real-time, wireless sensor networks.</i>
<i>Big Data</i> / Análise de dados / Modelagem e simulação (57 termos)	<i>algorithm, algorithms, apsim, aquacrop model, Big Data, Big Data analytics, boundary line analysis, ceres-maize model, cluster analysis, crop modeling, crop models, crop surface models, cross-semivariogram, data assimilation, data fusion, decision support, decision support system, decision-support, eddy-covariance, fao crop model, fuzzy clustering, geographically weighted regression, geostatistical analysis, geostatistics, hyperspectral data, hyperspectral reflectance, hyperspectral remote sensing, interpolation, kriging, least-squares regression, linear regression, model, model inversion, modeling, models, multispectral data, multivariate analysis, multivariate regression, partial least squares regression, point clouds, principal component analysis, random forest, random forest regression, random forests, remote-sensing data, sar data, satellite data, semivariogram, simulation, simulation-model, simulation-models, spatial analysis, spatial statistics, spectral analysis, support vector regression, time-series, wofost.</i>

Continua...

Tabela 7. Continuação

Sensoriamento/Satélites/ Geodado (78 termos)	<i>area index, band vegetation indexes, canopy chlorophyll content, canopy reflectance, canopy temperature, chlorophyll meter readings, crop surface model, cubesat, dem - digital elevation model, difference vegetation index, digital surface model, fluorescence, geographic information system, gis, gps, green lai - green leaf area index, hyperspectral vegetation indexes, index, indexes, induced chlorophyll fluorescence, lai, landsat, landsat-8, laser-induced fluorescence, leaf area index, leaf area index (lai), leaf optical-properties, leaf-area index, light-use efficiency, meter readings, modis, multispectral digital imagery, multispectral images, narrow-band, ndvi, nitrogen dilution curve, normalized difference vegetation index, photosynthetically active radiation, polarimetry, radarsat-2, radiation-use efficiency, radiative transfer, radiative transfer model, radiative-transfer, radiative-transfer model, rapideye, red, red edge, red edge position, red-edge, red-edge bands, reflectance, reflectance measurements, reflectance spectroscopy, remote estimation, remote sensing, satellite, satellite imagery, sensing, sentinel-1, sentinel-1a, sentinel-2, spatial dependence, spatial distribution, spatial-distribution, spectral index, spectral indexes, spectral indices, spectral radiance, spectral reflectance, surface models, surface reflectance, thermal imagery, vegetation index, vegetation indexes, vegetation indices, vegetation indices (vis), water-stress index.</i>
Tecnologia de sensores (11 termos)	<i>active canopy sensor, greenseeker sensor, optical sensor, radar, sar, sensor, sensors, soil moisture sensors, soil sensor, synthetic aperture radar, synthetic aperture radar (sar).</i>

Continua...

Tabela 7. Continuação

Veículos autônomos e drones (16 termos)	<i>airborne lidar, aircraft, drone, drones, lidar, uas, uav, uav remote sensing, unmanned aerial system, unmanned aerial system (uas), unmanned aerial systems, unmanned aerial vehicle, unmanned aerial vehicle (uav), unmanned aerial vehicles, unmanned aircraft systems, vehicle uav.</i>
Visão computacional (32 termos)	<i>3d, camera, cameras, computer vision, digital camera, digital images, high-resolution, hough transform, hyperspectral, hyperspectral imagery, hyperspectral imaging, hyperspectral lidar, image analysis, image processing, image-analysis, imagery, images, imaging, machine vision, multispectral, multispectral camera, multispectral imagery, obia, object detection, photogrammetry, rgb, segmentation, semantic segmentation, structure from motion, structure-from-motion, uav imagery, vision.</i>

Considerações finais

Os estudos bibliométricos utilizam indicadores quantitativos para mapear, avaliar e interpretar a produção científica de uma determinada área, ajudando a compreender o desenvolvimento e as tendências do tema. Permitem rastrear como uma área de pesquisa evolui ao longo do tempo possibilitando identificar temas emergentes, mudanças no foco de interesse e a velocidade com que um campo se desenvolve. A bibliometria mostra onde ainda há poucos estudos, ou seja, áreas com potencial para novas descobertas podendo levar a oportunidades para pesquisa, inovação ou negócios, especialmente em temas emergentes pouco explorados.

A bibliometria também ajuda a identificar os principais pesquisadores e instituições que estão dominando uma área de pesquisa, além de evidenciar padrões de colaboração entre eles, permitindo buscar novas redes de parcerias. Além de estudos bibliométricos, uma outra forma de prospectar as inovações das tecnologias 4IR para a transformação digital na agricultura é por meio do levantamento das

patentes. Leite et al. (2025) caracterizam um conjunto de patentes relacionadas com a transformação digital no setor de grãos focando nas culturas de soja, milho, arroz, trigo e feijão a partir de documentos de patentes recuperados na pesquisa da base Derwent Innovations Index no período de 2010 a 2021.

O presente trabalho teve como objetivo analisar quanti-qualitativamente a produção científica internacional, por meio da coleção da *Web of Science*, relacionada a tecnologias 4IR na atividade de grãos. Foi utilizada uma expressão de busca ampla, contendo as frases e/ou palavras que remetiam a assuntos relacionados à transformação digital na agricultura de modo geral, com termos como: agricultura digital, agricultura de precisão, agricultura inteligente, dentre outros. A busca também focou nos grãos de interesse, ou seja, milho, soja, arroz e feijão. Apesar do foco ser em grãos, algumas publicações mencionaram outras culturas como batata, cana-de-açúcar, beterraba, girassol, couve-flor, algodão tomate e florestas, o que indica que as tecnologias levantadas podem ser aplicadas em vários tipos de culturas além de grãos.

Ao realizar uma busca com termos relacionados à agricultura digital, a expectativa foi de recuperar publicações associadas às tecnologias 4IR nas culturas de grãos especificadas. Foram recuperadas 1.811 publicações que foram analisadas utilizando o software Vos-Viewer para construção e visualização de redes bibliométricas. De acordo com as análises, os Estados Unidos e a China apresentaram o maior número de publicações representadas principalmente pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e a Academia Chinesa de Ciências. Isso evidencia o posicionamento destes países como protagonistas na agricultura, seja como grande produtor ou consumidor. O Brasil ficou em terceiro lugar, sendo que a Universidade de Santa Maria foi a instituição com o maior número de publicações. Isso é indicativo da relevância do País como um importante protagonista da pesquisa em agricultura digital no mundo.

O estudo dos termos de maior ocorrência apontou que, no aspecto tecnológico, as publicações estavam mais relacionadas aos temas de agricultura de precisão; métodos de análise de dados; métricas

de cobertura vegetal; monitoramento, mapeamento e sensoriamento; modelagem e simulação; e visão computacional. Em termos de aplicações, observou-se uma concentração em mudanças climáticas e seus impactos, manejo de pragas e doenças, irrigação, análise de produtividade, manejo e conservação do solo, adubação e fertilização. Dessa forma, os documentos recuperados neste estudo mostram um foco em manejo e práticas na fase de produção.

Dentre os mil termos mais relevantes, o estudo levantou o conjunto de 282 termos específicos relacionados às tecnologias 4IR, representando 28,2% de presença nas publicações. Estes termos estavam mais associados às áreas de: elementos e componentes de computadores, softwares e sistemas eletrônicos; agricultura de precisão; automação e robótica; inteligência artificial; internet das coisas; *Big Data*, análise de dados, modelagem e simulação; sensoriamento, satélites e geodado; tecnologia de sensores; veículos autônomos e drones, além de visão computacional.

O trabalho focou nas aplicações das tecnologias 4IR nas culturas de grãos por representarem *commodities* importantes na balança comercial brasileira. No entanto, o trabalho pode ser expandido para outras áreas agrícolas, tais como hortaliças, fruticultura, culturas perenes e sistemas florestais. Dessa forma, entende-se ser possível acompanhar, por meio da produção científica, como as tecnologias 4IR têm fomentado novas aplicações e a automação dos processos produtivos nesses diferentes tipos de cadeias. Esse tipo de análise possibilitaria observar a evolução tecnológica digital em diversas frentes e propiciaria traçar desafios e oportunidades de inovação em cada um desses segmentos.

A evolução do número de publicações e de citações nos últimos anos mostra um crescimento constante nesta área, demonstrando que o uso das tecnologias 4IR em vários processos na agricultura em cultura de grãos tem ganhado relevância e importância ao longo do tempo. Com o avanço da transformação digital, e a consequente utilização das tecnologias 4IR na agricultura, a expectativa é que o número de publicações seja crescente nos anos que se seguem. Segundo Massurhá et al. (2020), alguns fatos podem explicar o avanço

do uso das tecnologias 4IR, como a popularização no uso destas tecnologias; o aumento de soluções de conectividade; a crescente necessidade por alimentos, fibras e energia demandando uma agricultura mais tecnificada; o surgimento de um consumidor mais informado e exigente; as pressões por sustentabilidade e eficiência, dentre outros.

Referências

CLARIVATE. **Web of Science platform**. Disponível em: <https://clarivate.com/products/scientific-and-academic-research/research-discovery-and-workflow-solutions/webofscience-platform/>. Acesso em: 1 nov. 2024.

LEIDEN UNIVERSITY. Centre for Science and Technologies Studies.

VOSviewer: visualizing scientific landscapes. Disponível em: <https://www.vosviewer.com/>. Acesso em: 1 nov. 2024.

LEITE, M. A. de A.; DE MORI, C.; GOUVEA, S. P. **Panorama de patentes no contexto da transformação digital para o setor de grãos**. Campinas: Embrapa Agricultura Digital, 2025. 33 p. il. color. (Embrapa Agricultura Digital. Documentos, 195). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1177257>. Acesso em: 14 jul. 2025.

MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; BOLFE, E. L. Agro 4.0: o papel da pesquisa e perspectivas para a transformação digital na agricultura. In: DIAS, E. M.; DOURADO NETO, D.; SCOTON, M. L. R. P. D.; OLIVEIRA, D. H. de; SANTOS, I. M. G. L. dos; MENEZES, J. H. V. (org.). **Agro 4.0**: fundamentos, realidades e perspectivas para o Brasil. Rio de Janeiro: Autografia, 2023. cap. 3, p. 58-77. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1154917/1/PL-Agro4.0-2023.pdf>. Acesso em: 2 out. 2024.

MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; EVANGELISTA, S. R. M. A transformação digital no campo rumo à agricultura sustentável e inteligente. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (ed.). **Agricultura digital**: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF: Embrapa, 2020. cap. 1, p. 20-45. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1126214/1/LV-Agricultura-digital-2020-cap1.pdf>. Acesso em: 2 out. 2024.

WHAT are Industry 4.0, the Fourth Industrial Revolution, and 4IR? 2022. Disponível em: https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-are-industry-4-0-the-fourth-industrial-revolution-and-4ir#. Acesso em: 23 jul. 2024.

