

# Fenotipagem de plantas de alto rendimento, genotipagem, agricultura de precisão e agricultura digital para uma agricultura sustentável e produtiva

*High-yield plant phenotyping, genotyping, precision agriculture and digital agriculture for sustainable and productive agriculture*

Paulo Sérgio de Paula Herrmann Junior<sup>1</sup>, Alberto Carlos de Campos Bernardi<sup>2</sup>, Breno Silva Beda de Assunção<sup>3</sup>, Carlos Manoel Pedro Vaz<sup>4</sup>, Evandro Chartuni Mantovani<sup>5</sup>, Juliana Erika de Carvalho Teixeira Yassitepe<sup>6</sup>, Margareth Gonçalves Simões<sup>7</sup>, Maria Angelica de Andrade Leite<sup>8</sup>, Maria Lucrecia Gerosa Ramos<sup>9</sup>, Ricardo Yassushi Inamasu<sup>10</sup>, Ricardo Fonseca Araujo<sup>11</sup>, Ronaldo Pereira de Oliveira<sup>12</sup>, Thiago Teixeira Santos<sup>13</sup>, Walter Quadros Ribeiro Junior<sup>14</sup>

<sup>1</sup> Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, paulo.herrmann@embrapa.br

<sup>2</sup> Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alberto.bernardi@embrapa.br

<sup>3</sup> Analista, Embrapa Gerência-Geral de Tecnologia da Informação, Brasília (DF), Brasil, breno.assuncao@embrapa.br

<sup>4</sup> Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, carlos.vaz@embrapa.br

<sup>5</sup> Pesquisador, Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas (MG), Brasil, evandro.mantovani@embrapa.br

<sup>6</sup> Pesquisadora, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, juliana.yassitepe@embrapa.br

<sup>7</sup> Pesquisadora, Embrapa Solos, Rio de Janeiro (RJ), Brasil, margareth.simoese@embrapa.br

<sup>8</sup> Pesquisadora, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, angelica.leite@embrapa.br

<sup>9</sup> Professora Titular, Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília (DF), Brasil, lucrecia@unb.br

<sup>10</sup> Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, ricardo.inamasu@embrapa.br

<sup>11</sup> Analista, Embrapa Gerência-Geral de Tecnologia da Informação, Brasília (DF), Brasil, ricardo.araujo@embrapa.br

<sup>12</sup> Pesquisador, Embrapa Solos, Rio de Janeiro (RJ), Brasil, ronaldo.oliveira@embrapa.br

<sup>13</sup> Pesquisador, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, thiago.santos@embrapa.br

<sup>14</sup> Pesquisador, Embrapa Cerrados, Brasília (DF), Brasil, walter.quadros@embrapa.br

## RESUMO

O presente trabalho apresenta um panorama da situação atual dos novos métodos de fenotipagem de plantas no Brasil e no mundo, a partir de 2008 até 2024, que é considerado complementar a genotipagem e a agricultura de precisão. Ressalta-se que o crescimento dessa área ocorreu tanto no desenvolvimento de infraestrutura por instituições de ciência e tecnologia quanto na geração do conhecimento, sendo que, neste período, o fator h foi de 162 (publicação/citação). Em 2008, eram seis Institutos de Ciência e Tecnologia (ICTs), e, em 2023, já são 43 novas instituições de pesquisa e desenvolvimento, sendo 15 do setor privado, bem como a criação de redes nacionais e internacionais, quanto à geração de conhecimento. A ciência de plantas e ciências agrárias está no centro dos principais desafios para as sociedades globais. O melhoramento de plantas não tem mantido o ritmo do aumento de produtividade; assim, esforços urgentes se fazem necessários para impulsionar o setor. A Embrapa, como instituição de pesquisa na agricultura tropical, vem apresentando várias ações estratégicas nessa direção, mas um novo salto deve ser dado, com a criação de uma política de Estado, que possibilite o estabelecimento de infraestrutura adequada para o treinamento de RH altamente qualificado e a logística para um país de dimensões continentais como o Brasil. A multidisciplinaridade advinda de expertises em planta, geociência, ciência da computação, agricultura de precisão e agricultura digital, e instrumentação são condições *sine qua non* para essa nova abordagem.

**Palavras-chave:** novos métodos de fenotipagem de plantas; bioeconomia; melhoramento de plantas; política de Estado; meio ambiente.

<https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000087>

 Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

## ABSTRACT

The present work presents an overview of the current situation of new plant phenotyping methods in Brazil and around the world from 2008 to 2024, which is considered complementary to genotyping and precision agriculture. It should be emphasized that the growth of this area occurred both in the development of infrastructure by science and technology institutions and in the generation of knowledge; in this period, the h factor was 162 (publication/citation). In 2008 there were 6 (ICTs) and by 2023, there were 43 new research and development institutions and 15 from the private sector, as well as the creation of national and international networks regarding the generation of knowledge. Plant science and agricultural sciences are at the center of the main challenges for global societies. Plant breeding has not kept pace with increased productivity, so urgent efforts are needed to boost the sector. Embrapa, as a research institution in tropical agriculture, has been presenting several strategic actions in this direction. However, a new leap must be taken in creating a State policy that allows the establishment of adequate infrastructure for the training of highly qualified HR and logistics for a country of continental dimensions. The multidisciplinary approach arising from plant expertise, geoscience, computer science, precision agriculture, and digital and instrumentation are sine qua non conditions for this new approach.

**Keywords:** new plant phenotyping methods; bioeconomy; plant breeding; state policy; environment.

## 1 BREVE INTRODUÇÃO E HISTÓRICO

As novas ferramentas provenientes da instrumentação, da automação, da agricultura de precisão e digital, da ciência de dados e dos métodos quantitativos são consideradas importantes e possibilitam a investigação em novos métodos de fenotipagem de plantas (FP) de forma não invasiva e de alto desempenho. A FP é entendida como estudo do comportamento da planta, permitindo a quantificação não invasiva da estrutura e da função, tanto das características fisiológicas da parte aérea quanto da raiz, e da sua relação com o meio ambiente em complexa transformação (Pieruschka; Schurr, 2019; Araus et al., 2018; Watt et al., 2020; Kaiser et al., 2024). A FP de alta eficiência pode ser utilizada não somente como ferramenta em programas de melhoramento, genômica e estudos fisiológicos/mecanismos de tolerância mas também para validar manejos de solo e plantas que diminuam os efeitos da seca, que poderiam ser utilizados em experimentos com manejos, como, por exemplo, o biochar (Batoool et al., 2015), a gessagem para aumentar o sistema radicular em solos com alumínio tóxico (Shafiq et al., 2021), os polímeros superabsorventes (Pereira et al., 2022), a aplicação de silício (Verma et al., 2022) e *water slope gradient* (Bagula et al., 2022) são alguns dos exemplos apresentados.

Em um levantamento feito pela empresa Keygenes, foi mostrada a diferença de tempo que ocorre entre o melhoramento clássico e o uso da nova fenotipagem de plantas, a fenômica, bem como a utilização das técnicas avançada de genotipagem. Neste trabalho, verificou-se essa diferença, e o tempo, para algumas culturas, que é em torno de 10 anos, pode ser reduzido, entre a pesquisa e a comercialização, em 5,5 anos (Van Tunen, 2016).

O mercado global estimado de sementes deverá atingir o valor de US\$ 71,53 bilhões em 2022.

Projeções para 2028 apontam uma taxa de crescimento anual composto de 6,3%, atingindo valores em torno de US\$ 103,4 bilhões (Research and Market, 2022). A América Latina estava ocupando o segundo lugar na taxa de crescimento anual composta (%), no período entre 2012 e 2018. O Brasil mantém o terceiro maior banco ativo de germoplasma (BAG) do mundo, e o maior da América Latina. O BAG brasileiro contém cerca de 120 mil amostras no total. Desse total, 14 mil acessos são de feijão, 27 mil de arroz, 4 mil de milho, 7, 2 mil de sorgo, 2 mil de milheto e 35 mil são de soja, entre acessos de espécies (cultivadas e selvagens) (Pádua et al., 2020). Apenas para soja, há 1.500 acessos selvagens e somente esse fator já demonstraria o impacto da investigação do comportamento da planta em condições tão adversas, advindas dos diferentes biomas do nosso país. E, desta forma, dá-se a agregação de valor à semente.

Assim, pode-se observar que a aplicação dos novos métodos de FP, juntamente com a genética, apresenta um espaço ilimitado da pesquisa (P), do desenvolvimento (D) e da inovação (I), e que, em função da sua utilização, poderá impactar significativamente o tempo do desenvolvimento de novos cultivares até a comercialização, e gerar novos conhecimentos (Pieruschka; Schurr, 2019; Watt et al., 2020; Kaiser et al., 2024), apresentando novas oportunidades na bioeconomia (Herrmann et al., 2019).

Uma visão holística da FP, que seja por intermédio da multidisciplinaridade, da automação, da agricultura de precisão, da agricultura digital, da ciência de dados, dos métodos quantitativos e da genotipagem de plantas, devem ser condições *sine qua non* na pesquisa agropecuária brasileira, não visando só à produtividade, mas também à geração de conhecimento.

## 2 DESAFIOS E CENÁRIOS QUE SE APRESENTAM PARA AS PRÓXIMAS DUAS DÉCADAS

Demorou quase dez mil anos para que os seres humanos produzissem globalmente 1,0 bilhão de toneladas de alimentos. A Revolução Verde levou a uma duplicação desse montante em apenas 40 anos, que ocorreu entre 1960 e 2000. Um dos principais impulsores da Revolução Verde foi a introdução dos chamados genes semianões (altura reduzida, genes Rht) no trigo (Voss-Fels et al., 2019).

O milênio recorde de secas em 1996/97, 2001-2003, 2006 e 2018 na Austrália ou 2003, 2010, 2015 e 2018 na Europa são exemplos de efeitos extremos da seca na produção agrícola (Voss-Fels et al., 2019).

Prevê-se que, em média, os rendimentos globais das principais culturas serão reduzidos em 6,0% no trigo, 3,2% no arroz, 7,4% no milho e 3,1% na soja para cada grau Celsius de aumento na temperatura média global (Zhao et al., 2017).

Apesar dos importantes avanços agrícolas para alimentar o mundo nos últimos 60 anos, um novo estudo mostra que a produtividade agrícola global é 21% menor do que poderia ter sido sem as mudanças climáticas. Isso equivale a perder cerca de sete anos de aumento de produtividade agrícola desde a década de 1960 (Ortiz-Bobea et al., 2021).

Há uma reconhecida necessidade de acelerar os ganhos genéticos junto aos programas de melhoramento de plantas em todo o mundo. A Tabela 1 apresenta uma síntese do trabalho de Jarquín e colaboradores (Jarquín et al., 2017) mostrando que o modelamento e a análise da resposta do genótipo em função do ambiente ( $G \times E$ ) podem acelerar o ganho, melhorando a acurácia do modelo de predição genômica. Segundo esse modelo, o aumento na predição se dá em função do coeficiente de variação (CV) obtido para o experimento com a inclusão de 100 linhas e 26 ambientes e 200 linhas e 17 ambientes.

No futuro, o sequenciamento do genoma de coleções inteiras de germoplasma presentes em bancos de germoplasma, com consequente associação com fenótipos, deverá ser um componente primário para todos os programas de melhoramento de culturas (Varshney et al., 2020).

**Tabela 1.** Síntese do resultados apresentados por Jarquín e colaboradores em trabalho de 2017.

		L+E	L+E+G	L+E+(GXE)
100 L e 26 E	L+E+G	↑1,5%	0,403 (CV)	↑13,9%
200 L e 17 E	L+E+G	↑1,5%	0,472 (CV)	↑14,4%

L= Linhas; E= Ambientes e G= Genótipo.

## 2.1 A importância da Fenotipagem Digital e Alto Desempenho e sua complementariedade com a Agricultura de Precisão e Digital

Os novos métodos de fenotipagem de plantas de alto desempenho atrelados às tecnologias genéticas que estão sendo propostas serão úteis na investigação dos *traits* de interesse advindo do comportamento da planta. Estes estão relacionadas às características fisiológicas de parte aérea e raiz, sendo influenciados por um ambiente em complexa transformação (Zhu et al., 2020; Costa et al., 2019).

As novas ferramentas e os novos métodos de fenotipagem de plantas (FP), provenientes da instrumentação, da automação, da agricultura de precisão e digital, da ciência de dados e dos métodos quantitativos, são considerados de rupturas e possibilitam a investigação de forma não invasiva, não destrutiva e de alto desempenho. Uma análise do passado, do presente e do futuro da fenotipagem de plantas é apresentado por Pieruschka e Schurr (2019) e Kaiser et al. (2024).

Com as novas tecnologias e os métodos de fenotipagem de plantas, há a tendência na melhoria do ganho genético (Gy). As oportunidades de melhoria são apresentadas por Watt e colaboradores em seu artigo de 2020 (Watt et al., 2020).

### 2.1.1 Impactos científicos e tecnológicos da área de fenotipagem de plantas

Do ponto de vista técnico-científico, verifica-se que o número de publicações, dos últimos 30 anos (1991 até 2023), cresceu exponencialmente, saindo de uma publicação em 1991 e alcançando a marca de 643 publicações por ano, em 2023. A Figura 1 apresenta em formato gráfico os números obtidos junto ao banco de dados da Clarivate, Web of Science, em abril de 2024, em que se apresenta a evolução anual, tanto do número de publicações como de citações. Nesse período, foram publicados 5.017 artigos em revistas internacionais. Em termos de citações, nota-se que no ano de 1996 ocorreram apenas duas citações, enquanto que em 2023 chegou-se acumuladamente à marca de 26.885 citações, o que confere um fator h da ordem de 162; note-se que esse mesmo fator em 2017 foi de 81. O total para esse período de 26 anos foi de 93.452 citações. Isto mostra, portanto, que essa área está crescendo nos últimos 12 anos, tanto em termos de número de publicações como de citações.

Utilizando o mesmo termo adotado acima e observando a proveniência dessas publicações e citações linkando os artigos vindos que tenham saído das pesquisas provenientes da Embrapa, verifica-se que, desde 2015 até 2023, já há um total de 41 publicações em revistas internacionais indexadas.

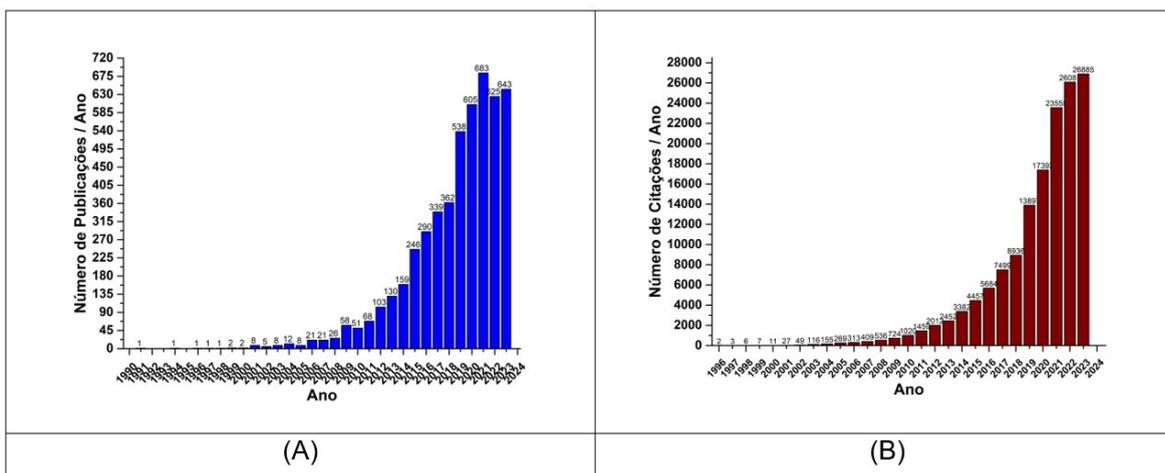


Figura 1. Gráfico com o resultado de busca do número de (A) publicações e (B) citações anualmente por intermédio da palavra-chave “Plant Phenotyping” em tópicos. A ferramenta utilizada para a busca foi o “Web of Science” da Thomas Reuters.

Ressalte-se que esses mesmos trabalhos enfatizam a aplicação de ferramentas como os novos métodos de fenotipagem de plantas. Além do corpo de pesquisadores das unidades que participam do grupo de pesquisa Rede Brasileira de Fenotipagem de Plantas (RBFPP), observa-se, pelas publicações acima, que já há dez unidades desenvolvendo atividades, gerando resultados e inovação para a área. Seguem abaixo as unidades da Embrapa que estão publicando trabalhos em revistas especializadas, com parcerias nacional e internacional: - Embrapa Agroenergia; - Embrapa Agricultura Digital; - Embrapa Arroz e Feijão; - Embrapa Instrumentação; - Embrapa Cerrados; - Embrapa Gado de Corte; - Embrapa Mandioca e Fruticultura; - Embrapa Milho e Sorgo; - Embrapa Meio Norte; - Embrapa Trigo, e - Embrapa Soja. Quanto ao fator h para as publicações da Embrapa, no tema, utilizando o banco de dados da Web of Science, obteve-se que, em 2015, esse fator era de 2, e em 2023, o seu h foi para 13, mostrando o crescimento tanto em número de citações como de publicações no período.

Pela Base *Derwent*”, para o mesmo termo usado no Web of Science (“Topic: plant phenotyping”), na data 06/02/2021, obteve-se um total de 80 patentes desde 1998, sendo que 70 das mesmas estão relacionadas à área de instrumentação e 62 delas estão ligadas à agricultura. A Embrapa Soja, juntamente com um grupo da Argentina, possui uma patente internacional, desde 2012, denominada *Automatic phenotyping platform for plants suffering from water deficit, has weighing unit, irrigation unit and image capture unit that are connected to central computer to store received data, and to vary activa-*

*tion times of irrigation*, com o número de patente WO2012042084-A1.

A Figura 2 apresenta uma comparação do tema fenotipagem com outras áreas. Pode ser verificado que o mesmo começou a se destacar a partir de 2005, ultrapassando as demais áreas, de forma comparativa, em 2012. A frequência de publicações é uma normalização relacionando o número de publicações daquele ano, utilizando a base de dados *Scopus*, pelo número de habitantes do Planeta Terra naquele ano (Costa et al., 2019).

Na Figura 3 (A) e (B), é apresentada a evolução referente à relação do número de institutos de ciência e tecnologia, bem como a formação de redes nacionais e internacionais de pesquisas, com os novos métodos de fenotipagem de plantas (NMFP). A Austrália foi pioneira nos NMFPs, inaugurando em 2007, a *Australian Plant Phenomics Facility* (APPF). A partir daí, vários trabalhos vêm sendo realizados. O exemplo de maior sucesso foi o trigo geneticamente modificado, o qual apresentou ganhos de rendimento entre 20 a 30% (Braidotti, 2019). De acordo com a Rede Internacional de Fenotipagem de Plantas (IPPN), em 2021, o número de sócios era de 41 instituições da academia, 12 empresas da iniciativa privada, sendo que seis são *clusters* de diversos países.

No âmbito da Embrapa, em 2022, foi realizado um levantamento dos projetos que estivessem tratando de novos métodos de fenotipagem por meio de uma busca nos campos de título de projetos, atividades e palavras-chave, utilizando o *software* corporativo Quaesta (Dias et al., 2017), que realiza buscas de expressões de texto, em projetos em execução, armazenados na base de projetos Sistema Embrapa de Gestão, imple-

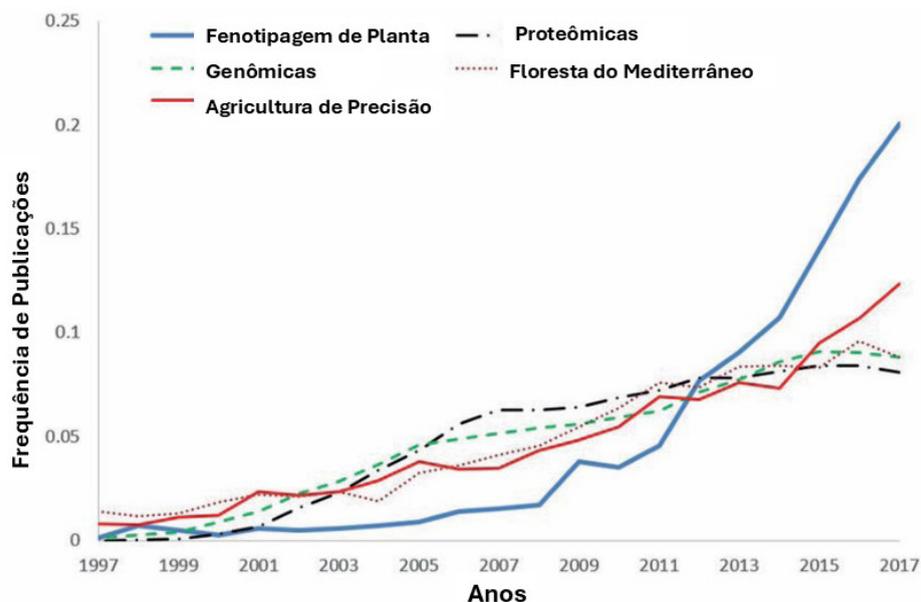


Figura 2. Frequência de publicações em fenotipagem de plantas de 1997 até 2017, comparado com outros temas: Genômica, Proteômica, Floresta do Mediterrâneo e Agricultura de Precisão (Costa et al., 2019).

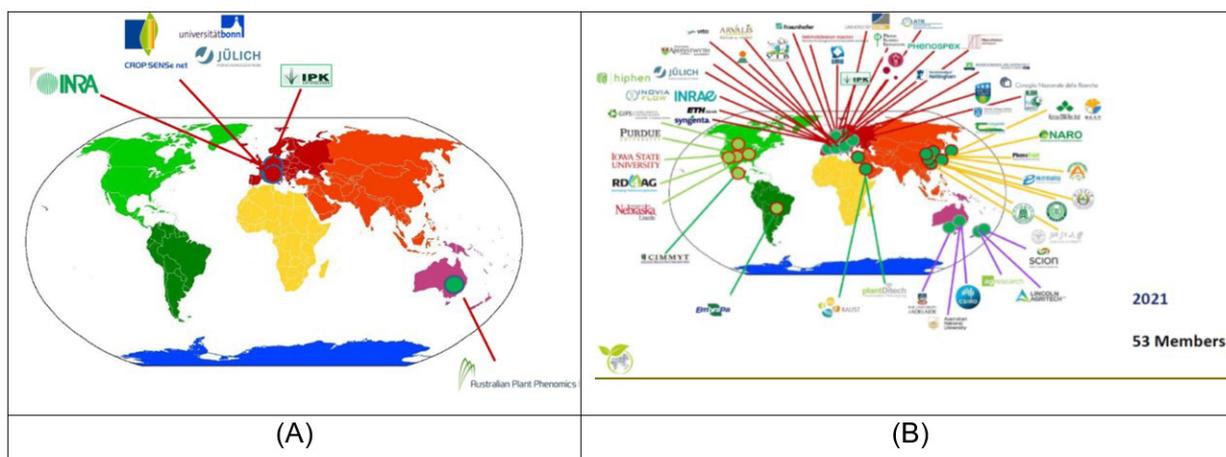


Figura 3. Mapa global da evolução e distribuição das redes nacionais e internacionais de fenotipagem de plantas por países e instituições em 2008 (A) e 2021 (B).

mentado por meio do *software* corporativo Ideare<sup>1</sup>. Observou-se uma distribuição grande no número de projetos em execução, que possuem “Atividades – Descrição”, relativos ao termo de busca “fenotipagem de plantas”, agrupados em 34 diferentes Portfólios<sup>2</sup> da

<sup>1</sup> Disponível em: <https://sistemas.sede.embrapa.br/ideare/>. Acesso restrito aos empregados da Embrapa.

<sup>2</sup> Portfólios são instrumentos de apoio gerencial para organização de projetos da Embrapa em temas estratégicos. A missão dos portfólios é direcionar a produção de soluções em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) para demandas nacionais e suas interfaces com as demandas regionais. Para isso, são consideradas as megatendências apontadas para a agricultura brasileira, bem como forças modeladoras do futuro. Tais ferramentas têm os objetivos de assegurar a melhoria contínua da

Embrapa, sendo que o maior número de projetos está no Portfólio Bioinsumos (105), seguido pelo Portfólio Grãos (89) e Automação (88). A Figura 4 apresenta a distribuição de números de projetos em execução, por portfólios, que possuem na sua “Atividade-Descrição” a palavra-chave “Fenotipagem de plantas”, utilizando o Questa como ferramenta de busca.

sua programação, reduzir redundâncias, maximizar o uso dos recursos públicos e possibilitar maior coordenação dos esforços e das suas competências. Disponível em: <https://www.embrapa.br/pesquisa-e-desenvolvimento/portfolios>. Acesso em: 13 ago. 2022.

## ■ Projetos em execucao com K-W Fenotipagem de plantas

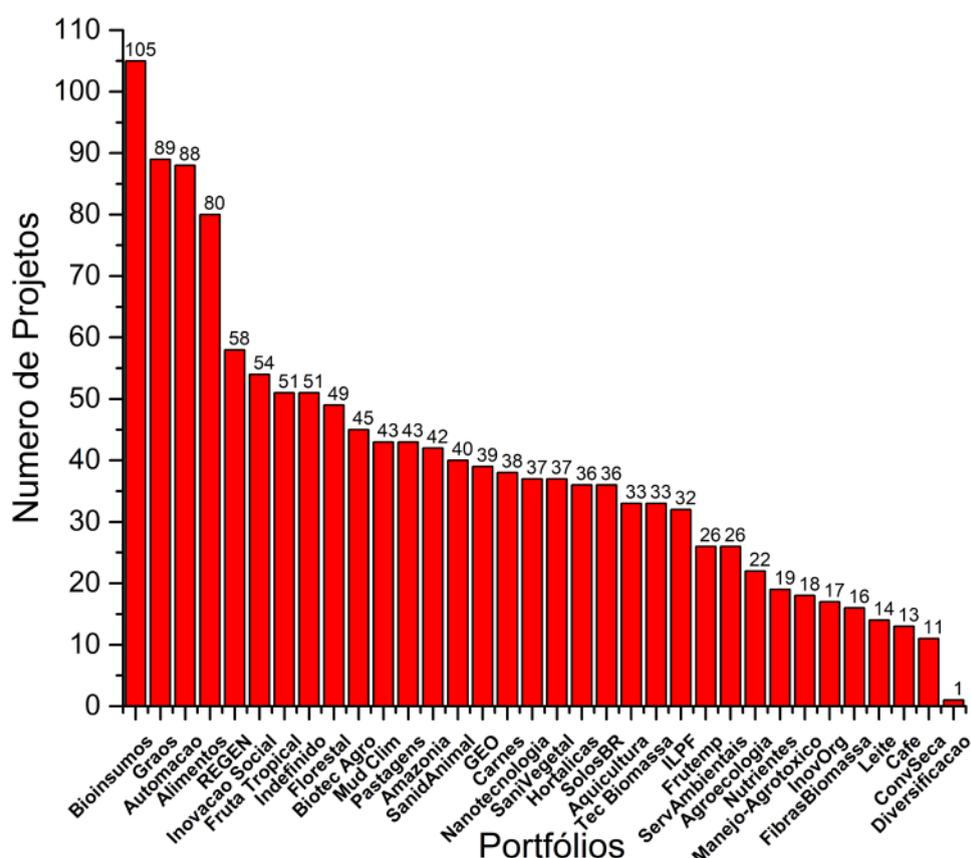


Figura 4. Distribuição de projetos em execução, nos Portfólios da Embrapa, que possuem na sua “Atividade-Descrição” a palavra-chave “Fenotipagem de plantas”.

### 3 AÇÕES QUE JÁ FORAM E QUE VÊM SENDO REALIZADAS PELA EMBRAPA NA ÁREA DE FENOTIPAGEM DE PLANTAS

Em um cenário de mudanças climáticas globais e necessidade de preservação do uso de recursos naturais, que se tornam cada vez mais escassos, pode ocorrer a redução na produtividade das principais culturas agrícolas o que representa um risco para o agronegócio e a segurança alimentar mundial. Neste contexto, para que a Embrapa se mantenha na vanguarda do desenvolvimento de cultivares de plantas que otimizem o uso dos recursos naturais disponíveis e sejam resistentes aos principais tipos de estresses abióticos, tais como temperaturas elevadas, intensidade luminosa e escassez de água no solo, é necessário o emprego das técnicas de fenotipagem de alto desempenho que utilizam as tecnologias digitais para acelerar o desenvolvimento de novas cultivares. Para atingir este objetivo, a Embrapa tem se envolvido em várias iniciativas, visando alavancar a fenotipagem de alto desempenho na empresa, conforme listado a seguir:

- Iniciado em 2004: *Drought Phenotyping Network (Generation Challenge Program)*;
- Desenvolvida a Plataforma SITIS de fenotipagem da Embrapa Arroz e Feijão;
- No fim de 2017, a parceria entre a Embrapa, a Unicamp e a FAPESP criou o Centro de Pesquisa em Genômica Aplicada às Mudanças Climáticas (*Genomics for Climate Change Research Center - GCCRC*), unindo competências das duas primeiras instituições em biotecnologia agrícola. O Centro oferece um laboratório de fenotipagem em condições de ambiente controlado e uma moderna casa de vegetação (Yassitepe et al., 2020);
- Instalação entre outubro de 2012 e outubro de 2015 do Labex Embrapa Europa, posto avançado Alemanha no Forschungszentrum Jülich, IBG 2: Ciência de Plantas - Jülich, Alemanha;
- Contemplado no documento da Agropensa: O Futuro de Desenvolvimento Tecnológico da Agricultura Brasileira – Visão 2014 - 2034;

- O tema FP foi escolhido como uma das áreas do Programa de Pós-graduação e Cientista Visitante da Embrapa, em 2014;
- Foi realizado o *Workshop Phenotyping for the Future*, Embrapa Sede, Brasília-DF, 17/09/13;
- Foi realizado o *Embrapa Plant Phenotyping Workshop (Past, Present and Future)*, Embrapa Sede, Brasília-DF, 02 a 04/09/2014;
- Criação junto ao grupo de pesquisa do CNPq, em dezembro de 2014, da Rede Brasileira de Fenotipagem de Plantas, com 53 pesquisadores cadastrados de 15 unidades descentralizadas da Embrapa e três ICTs. Conta com 19 linhas de pesquisa, 18 estudantes, cinco Intuições Internacionais. (<http://dgp.cnpq.br/dgp/espelhogrupo/7628749066451461>. Acesso em: 13 ago. 2022.);
- Envio de Carta-Consulta para Arranjo, na Embrapa, com o título Plataforma de Fenotipagem de Plantas para a Agricultura, enviado ao CGP no dia 11 de setembro de 2015;
- Aprovação do arranjo Métodos e técnicas modernas visando a fenotipagem de plantas para o avanço da agricultura (FPAGro), em junho de 2017;
- Realização da *II Latin-American Conference on Plant Phenotyping and Phenomics for Plant Breeding*, que ocorreu de 20 a 22 de setembro de 2017, na Embrapa Instrumentação, São Carlos-SP, contando com a participação de 83 pessoas de 12 países. A programação contou com seis *Key Speakers*, 16 Apresentações Oraís, 41 pôsteres e um *Proceedings* publicado, com 57 resumos. (<https://www.cnpdia.embrapa.br/eventos/laphpb/>. Acesso em: 13 ago. 2022.);
- Publicação no BCA da Embrapa, número 32, do dia 20/06/2018, a transformação em portfólio do arranjo Métodos e Técnicas Modernas, visando a Fenotipagem de Plantas para o Avanço da Agricultura (FPAGro) e nomeando o seu comitê gestor;
- A Embrapa foi votada na assembleia geral (AG) do IPPN como membro associado do *International Plant Phenotyping Network (IPPN)*, com sede na cidade de Juelich, na Alemanha. A AG, que votou as indicações, ocorreu na cidade de Adelaide, Austrália, no dia 01/10/2018;
- No livro organizado pelo ex-Ministro Roberto Rodrigues, com o título *Agro e Paz – Análises e propostas para o Brasil alimentar o mundo*, de 2018 (<http://www.esalq.usp.br/biblioteca/pdf/AgroPaz.pdf>), que apresenta um Plano de Estado (horizonte 2030-três governos) do Brasil para o mundo, em Segurança Alimentar, os novos métodos de fenotipagem de plantas está descrito no capítulo Tecnologia e Inovação no Agro, organizado e redigido pelo Dr. Silvio Crestana;
- Em fevereiro de 2019, com a modificação no número de portfólios da Embrapa, o FPAGro se associou ao recém-criado Portfólio Automação, Agricultura de Precisão e Digital, sendo que um desafio de inovação (DI) desse portfólio é: Viabilizar ferramentas de fenotipagem de alta resolução e automação para uso no melhoramento de bovinos, milho, soja e cana-de-açúcar tolerantes aos fatores bióticos e abióticos;
- A Embrapa participa do *steering committee* do grupo de trabalho *Controlled Environment Plant Phenotyping (CePPG)* (<https://www.plant-phenotyping.org/index.php?index=682>), do IPPN, desde 2020. Em maio de 2022, o grupo de trabalho organizou o *IPPN-CEPPG Workshop on Environment Plant Phenotyping* (<https://meetings.ipk-gatersleben.de/ceppg2022/>. Acesso em: 13 ago. 2022.);
- O número de projetos da Embrapa, que possui entre as suas atividades a aplicação de drones em fenotipagem de plantas de alto desempenho – busca em que foi utilizada a ferramenta “Questa” da Embrapa –, passou de uma atividade no ano de 2015 para dez, em 2023.

#### 4 DESAFIOS FUTUROS

A área de fenotipagem de alto rendimento assume grande importância no melhoramento genético de plantas, uma vez que, com o uso das tecnologias digitais que automatizam o monitoramento das câmaras de crescimento e dos experimentos realizados em campo, pode acelerar as pesquisas de novas cultivares de culturas agrícolas mais resistentes ao estresse causado pelas mudanças climáticas, representado por altas temperaturas e longos períodos de restrição hídrica.

De acordo com Yassitepe et al., 2020, técnicas de fenotipagem mais precisas e em larga escala podem e devem ser empregadas visando acelerar a disponibilização de genótipos adaptados às condições regionais específicas, modificadas pelas alterações recentes no clima. As novas tecnologias estão sendo empregadas para incrementar a quantidade, a qualidade e a pluralidade dos caracteres medidos e permitir, com o apoio de análises estatísticas modernas, a distinção de efeitos fenotípicos.

Ainda existem muitos desafios na área de fenotipagem a serem trabalhados na Embrapa, como os listados a seguir:

- Apenas para soja, há 1.500 acessos que são selvagens e somente esse fator já demonstraria o impacto da investigação do comportamento da planta em

condições tão adversas como as advindas dos diferentes biomas do nosso País; desta forma, dá-se a agregação de valor à semente;

- Reduzir a diferença de tempo entre o melhoramento clássico e o uso da nova fenotipagem de plantas, a fenômica, bem como a utilização das técnicas avançadas de genotipagem, que varia entre 10 e 15 anos, para determinadas culturas, em aproximadamente 5,5 anos. Esse tempo é relacionado entre a pesquisa e comercialização;
- Os programas de melhoramento no desenvolvimento de cultivares tolerantes a estresses bióticos e abióticos. O caráter não destrutivo, minimamente invasivo e automatizado das medidas possibilitará identificar indivíduos superiores em gerações segregantes, preservando-os, além de permitir uma pressão de seleção maior, devido à acurácia do processo como um todo. Em conjunto com a genômica, a proteômica e a metabolômica, possibilitarão a redução do número de experimentos em ambientes contrastantes, abreviando o processo de melhoramento;
- A aplicação dos novos métodos e técnicas, como drones, aprendizado de máquina, *Deep Learning*, robôs, sensores, biosensores e automação à fenotipagem, juntamente com Genotipagem de alto desempenho, deverão permitir economia de tempo, maior precisão e segurança no diagnóstico, investigação da estrutura e função, redução do número de medidas destrutivas, bem como dos erros sistemáticos e aleatórios dos experimentos, entre outros;
- Formação de recursos humanos, contemplando a multidisciplinaridade e a interinstitucionalidade;
- Fortalecimento da colaboração nacional e internacional para trabalhos conjuntos e unificação de protocolos comuns;
- Estabelecimento de parcerias com a iniciativa privada;
- *Data Management* aplicado aos novos métodos de fenotipagem de plantas;
- A integração da Fenotipagem, da Genotipagem, das ferramentas da Agricultura de Precisão e Agricultura Digital serão condições *sine qua non* na busca do conhecimento, da sustentabilidade, da tomada de decisão, da inovação e da produtividade.

#### AGRADECIMENTOS

Projeto Agricultura de Precisão (AP) para sustentabilidade do sistema produtivo agrícola, pecuário e florestal brasileiro, número 01.14.09.001.04.04 e Portfólio Automação e Agricultura de Precisão e Digital. Projeto

Embrapa número 20.22.01.001.00 – Melhoramento genético de trigo para o Brasil - 2023 a 2026.

#### REFERÊNCIAS

- ARAUS, J. L.; KEFAUVER, S. C.; ZAMAN-ALLAH, M.; OLSEN, M. S.; CAIRNS, J. E. Translating high-throughput phenotyping into genetic gain. **Trends in Plant Science**, v. 23, n. 5, p. 451-466, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.02.001>.
- BAGULA, E. M.; MAJALIWA, J. M.; BASAMBA, T. A.; MONDO, J. M.; VANLAUWE, B.; GABIRI, G.; TUMUHAIRWE, J.; MUSHAGALUSA, G. N.; MUSINGUZI, P.; AKELLO, S.; EGERU, A.; TENYWA, M. M. Water use efficiency of maize (*Zea mays* L.) crop under selected soil and water conservation practices along the slope gradient in Ruzizi Watershed, Eastern D.R. Congo. **Land (Basel)**, v. 11, n. 10, p. 1833, 2022. DOI: <http://doi.org/10.3390/land11101833>.
- BATOOL, A.; TAJ, S.; RASHID, A.; KHALID, A.; QADEER, S.; SALEEM, A. R.; GHUFRAN, M. A. Potential of soil amendments (Biochar and Gypsum) in increasing water use efficiency of *Abelmoschus esculentus* L. Moench. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, n. 733, 2015. DOI: <http://doi.org/10.3389/fpls.2015.00733>
- BRAIDOTTI, G. **'Over expression' of three wheat genes linked to yield gains**. 2019. Disponível em: <https://groundcover.grdc.com.au/crops/cereals/new-genetic-pathways-to-increase-wheat-yields>. Acesso em: 13 ago. 2022.
- COSTA, C.; SCHURR, U.; LORETO, F.; MENESATTI, P.; CARPENTIER, S. Plant phenotyping research trends, a science mapping approach. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 1933, 2019. DOI: <http://doi.org/10.3389/fpls.2018.01933>.
- DIAS, F. R. T.; CAMPOS, M. M.; FIGUEIREDO, M. C. B.; MATSUURA, M. I. da S. F. **Oportunidades em avaliação de ciclo de vida nos projetos da Embrapa usando o software Quaesta**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2017. 13 p. (Embrapa Pantanal. Documentos, 149). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181406/1/DOC-149-completo-Embrapa-Pantanal-2.zip>. Acesso em: 07 out. 2022.
- RESEARCH AND MARKETS. **Global seeds market: trends and forecast analysis till 2028 (by type, crop type, distribution channel, by region, by country)**, 2022. Disponível em: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5680917/global-seeds-market-2022-edition-trends-and#src-pos-4>. Acesso em: 13 ago. 2022.
- HERRMANN, P. S. P.; CRESTANA, S.; RIBEIRO JUNIOR, W. Q.; SOUSA, C. A. F.; SANTOS, T. T.; LANNA, A. C. Cenário atual dos novos métodos de fenotipagem de plantas e urgência nas ações de imersão do Brasil na era da bioeconomia. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 2019, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos: Embrapa, 2019. p. 289-294.

- JARQUÍN, D.; LEMES DA SILVA, C.; GAYNOR, R. C.; POLAND, J.; FRITZ, A.; HOWARD, R.; BATTENFIELD, S.; CROSSA, J. Increasing genomic-enabled prediction accuracy by modeling genotype × environment interactions in Kansas wheat. **The Plant Genome**, v. 10, n. 2, p. plantgenome2016.12.0130, 2017. DOI: <http://doi.org/10.3835/plan-genome2016.12.0130>.
- KAISER, E.; VON GILLHAUSSEN, P.; CLARKE, J.; SCHURR, U. Editorial: IPPS 2022 - plant phenotyping for a sustainable future. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1383766, 2024. DOI: <http://doi.org/10.3389/fpls.2024.1383766>.
- ORTIZ-BOBEA, A.; AULT, T. R.; CARRILLO, C. M.; CHAMBERS, R. G.; LOBELL, D. B. Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 4, p. 306-312, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1>.
- PÁDUA, J. G.; ALBUQUERQUE, M. S. M.; DE MELO, S. C. M. **Bancos e coleções de germoplasma da Embrapa: conservação e uso**. Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2020. 167 p. (Séries Documentos 371).
- PEREIRA, L. F.; RIBEIRO JÚNIOR, W. Q.; RAMOS, M. L. G.; SOARES, G. F.; LIMA GUIMARÃES, C.A. The impact of polymer on the productivity and photosynthesis of soybean under different water levels. **Agronomy (Basel)**, v. 12, n. 11, p. 2657, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12112657>.
- PIERUSCHKA, R.; SCHURR, U. Plant phenotyping: past, present, and future. **Plant Phenomics**, v. 26, p. 7507131, 2019. DOI: <http://doi.org/10.34133/2019/7507131>.
- SHAFIQ, B. A.; NAWAZ, F.; MAJEED, S.; AURANGZAIB, M.; MAMUN, A. A.; AHSAN, M.; AHMAD, K. S.; SHEHZAD, M. A.; ALI, M.; HASHIM, S.; HAQ, T. U. Sulfatebased fertilizers regulate nutrient uptake, photosynthetic gas exchange, and enzymatic antioxidants to increase sunflower growth and yield under drought stress. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 3, p. 2229-2241, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1007/s42729-021-00516-x>.
- VARSHNEY, R. K.; SINHA, P.; SINGH, V.; KUMAR, A.; ZHANG, Q.; BENNETZEN, J. L. 5Gs for crop genetic improvement. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 56, p. 190-196, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.12.004>.
- VERMA, K. K.; SONG, X. P.; LIN, B.; GUO, D. J.; SINGH, M.; RAJPUT, V. D.; SINGH, R. K.; SINGH, P.; SHARMA, A.; MALVIYA, M. K.; CHEN, G. L.; LI, Y. R. Silicon induced drought tolerance in crop plants: physiological adaptation strategies. **Silicon**, v. 14, n. 6, p. 2473-2487, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1007/s12633-021-01071-x>.
- VOSS-FELS, K. P.; STAHL, A.; HICKEY, L. T. Q&A: modern crop breeding for future food security. **BMC Biology**, v. 17, n. 1, p. 18, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1186/s12915-019-0638-4>.
- WATT, M.; FIORANI, F.; USADEL, B.; RASCHER, U.; MULLER, O.; SCHURR, U. Phenotyping: new windows in to the plant for breeders. **Annual Review of Plant Biology**, v. 71, n. 1, p. 689-712, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042916-041124>.
- YASSITEPE, J.E. de C. T.; DANTE, R. A.; GERHARDT, I. R.; FERNANDES, F. R.; SOUZA, R. S. C. de; ARMANHI, J. S. L.; SILVA, V. C. H. da; RIBEIRO, A. P.; SILVA, M. J. da; ARRUDA, P. Genômica aplicada às mudanças climáticas: biotecnologia para a agricultura digital. 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. (Eds.). **Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. cap. 11, p. 258-276.
- ZHAO, C.; LIU, B.; PIAO, S.; WANG, X.; LOBELL, D. B.; HUANG, Y.; HUANG, M.; YAO, Y.; BASSU, S.; CIAIS, P.; DURAND, J.-L.; ELLIOTT, J.; EWERT, F.; JANSSENS, I. A.; LI, T.; LIN, E.; LIU, Q.; MARTRE, P.; MÜLLER, C.; PENG, S.; PEÑUELAS, J.; RUANE, A. C.; WALLACH, D.; WANG, T.; WU, D.; LIU, Z.; ZHU, Y.; ZHU, Z.; ASSENG, S. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 114, n. 35, p. 9326-9331, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>.
- ZHU, X.; ORT, D. R.; PARRY, M. A. J.; CAEMMERER, S. V. A wish list for synthetic biology in photosynthesis research. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, n. 7, p. 2219-2225, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1093/jxb/eraa075>.