

Adoção de tecnologias 4.0 na produção de soja: fatores determinantes em pequenas propriedades rurais

Resumo: a Agricultura 4.0 incorpora tecnologias digitais capazes de elevar a produtividade e promover práticas sustentáveis. Contudo, sua adoção ainda é desigual em pequenas propriedades. Buscou-se responder: quais variáveis socioeconômicas e tecnológicas explicam significativamente a adoção de tecnologias 4.0 e seus efeitos na produtividade da soja em pequenas propriedades? Este estudo analisou determinantes da adoção em uma amostra de 143 produtores de soja de Irati-PR, por meio de pesquisa quantitativa com agricultores vinculados a uma cooperativa. Os dados foram analisados por meio de modelos de regressão múltipla. Os resultados indicaram que a conectividade é o principal fator explicativo, enquanto a escolaridade mostrou efeito limitado. O suporte técnico da cooperativa favoreceu a incorporação de ferramentas digitais, mas custos elevados e restrições de crédito seguiram como barreiras. Conclui-se que investimentos em conectividade e capacitação são fundamentais para ampliar a inclusão digital no campo e fortalecer a sustentabilidade produtiva.

Palavras-chave: Agricultura 4.0, Regressão Linear, Pequenos Produtores, Soja, Tecnologias Digitais.

1. Introdução

A transformação digital no campo tem se intensificado com a ascensão da Agricultura 4.0, que incorpora tecnologias como sensores, internet das coisas (IoT), inteligência artificial (IA), big data e sistemas de informação geográfica (SIG), com potencial de elevar a produtividade, otimizar o uso de insumos e favorecer práticas sustentáveis (Deng, Jing & Shen, 2022; Savastano et al., 2025). Apesar do potencial, a adoção dessas inovações é desigual, sobretudo em propriedades de pequeno e médio porte, onde fatores estruturais e socioeconômicos dificultam a integração tecnológica (Amoussouhoui et al., 2024; Renzcherchen, Teixeira & Stéfani, 2022). Estudos como Gyamfi et al. (2024) e relatórios da Embrapa demonstram que a adoção de tecnologias digitais no meio rural aumenta a produtividade e atendem aos ODS 2 e ODS 9 ao promover inovação, infraestrutura resiliente e industrialização sustentável.

A literatura aponta que escolaridade, renda, conectividade e suporte técnico são determinantes do processo de adoção (Eyike Mbongo & Djoumessi, 2024; Eastwood et al., 2017). No Paraná, Salvodi, Staduto e Kreter (2023) identificaram a conectividade como fator decisivo entre produtores de soja do Oeste do estado, destacando o papel das cooperativas na difusão tecnológica. Rocha (2021) ressalta ainda que o custo elevado dos equipamentos e a dificuldade de acesso ao crédito permanecem como barreiras recorrentes. Diante desse cenário, este estudo analisa os fatores que influenciam a adoção de tecnologias da Agricultura 4.0 em pequenas propriedades produtoras de soja em Irati-PR, para compreender as variáveis socioeconômicas e tecnológicas que explicam a incorporação dessas inovações e seus efeitos sobre a produtividade.

2. Determinantes da adoção da Agricultura 4.0

A literatura evidencia que a conectividade é o principal determinante da adoção tecnológica, uma vez que propriedades com melhor acesso digital possuem maior probabilidade de incorporar ferramentas inovadoras (Ahmad et al., 2024; Eyike Mbongo & Djoumessi, 2024). Entretanto, a baixa qualidade da internet em áreas rurais limita o avanço da automação e da gestão digital, como já observado no Paraná (Agência de

Notícias do Paraná, 2024). Outro fator decisivo é o capital humano: agricultores com maior nível educacional demonstram maior capacidade de compreender e aplicar novas tecnologias, reduzindo resistências e aumentando a confiança na tomada de decisão digital (Prokopy et al., 2019). A capacitação contínua é apontada como requisito essencial para consolidar esse processo (Inwood & Dale, 2019).

No Brasil, Rocha (2021) evidenciou que o custo elevado das ferramentas e a dificuldade de acesso ao crédito reduzem a capacidade de modernização em propriedades rurais. De forma complementar, Salvodi, Staduto e Kreter (2023) verificaram que a conectividade e o suporte técnico das cooperativas são fundamentais para a difusão tecnológica, demonstrando que a atuação da Cooperativa Lar foi determinante na disseminação de ferramentas digitais no Oeste do Paraná. A adoção da Agricultura 4.0 deve ser compreendida como resultado da interação entre infraestrutura digital, capital humano e suporte institucional, que, em conjunto, moldam as condições de acesso, utilização e difusão das inovações tecnológicas no campo.

3. Metodologia

A pesquisa é de natureza quantitativa e caráter exploratório-descritivo, realizada com produtores de soja vinculados a uma cooperativa de grãos em Irati-PR. A amostra abrangeu 143 pequenos agricultores, que responderam a um questionário estruturado sobre perfil socioeconômico, acesso a tecnologias e percepção sobre ganhos de produtividade. As variáveis independentes consideradas incluíram conectividade e escolaridade, enquanto a variável dependente foi a adoção de tecnologias 4.0 e seus efeitos percebidos sobre a produtividade.

Com base na revisão de literatura, foram formuladas as seguintes hipóteses para teste estatístico: H0: Propriedades com melhor conectividade têm maior probabilidade de adoção tecnológica ($\beta > 0$); H1: Escolaridade correlaciona-se positivamente com a adoção de tecnologias 4.0 ($\beta > 0$); H2: O uso de tecnologias 4.0 aumenta a produtividade das pequenas propriedades de soja ($\beta > 0$).

A análise dos dados foi conduzida por meio de modelos de regressão múltipla, permitindo identificar a significância estatística de cada determinante e testar as hipóteses propostas. Esse delineamento possibilita compreender a influência de fatores tecnológicos e socioeconômicos na incorporação de inovações digitais em propriedades de pequeno porte.

4. Resultados e Discussão

4.1 Caracterização da amostra e determinantes da adoção tecnológica

O perfil evidenciou predominância de produtores com ensino médio completo (40,7%), seguido por ensino fundamental incompleto (16,3%) e ensino superior completo (14,6%). Apenas 4,9% possuíam pós-graduação, o que indica níveis educacionais predominantemente intermediários. Esses resultados reforçam a desigualdade estrutural identificada por Amoussouhoui et al. (2024), segundo a qual agricultores de menor nível educacional tendem a apresentar mais barreiras na adoção tecnológica, ainda que a experiência prática possa compensar lacunas formais de formação.

Quanto ao tamanho das propriedades, 88,6% destinavam mais de 20 hectares ao cultivo de soja e empregavam até cinco trabalhadores. Esse perfil é característico de pequenas propriedades conforme os parâmetros do INCRA, cujas limitações estruturais podem restringir a modernização (Savastano et al., 2024). Apesar dessas barreiras, a porcentagem de produtores (50,4%) que cultivava soja há mais de 20 anos, sugere um capital de experiência consolidado, fator que segundo Prokopy et al. (2019) pode

influenciar positivamente a aceitação de novas práticas, mesmo diante de restrições socioeconômicas. Outro dado relevante é o amplo uso de sementes transgênicas (95,9%), confirmando a rápida difusão de inovações tecnológicas no setor, em linha com Deng, Jing e Shen (2022), que destacam a tendência de incorporação de biotecnologias como passo inicial para a transição rumo à Agricultura 4.0.

A análise de regressão linear múltipla foi realizada para investigar a relação entre escolaridade e conectividade (variáveis independentes) e a adoção tecnológica (variável dependente). O modelo apresentou significância estatística ($F(2,121) = 3,781$; $p = 0,026$), mas baixo poder explicativo ($R^2 = 0,060$), sugerindo que outros fatores não incluídos no modelo também influenciam a adoção, conforme tabela 2.

Tabela 1 – Modelo de regressão com preditores Grau Escolaridade e Conectividade.

Modelo 1			
R	R ²	R ² ajustado	Erro padrão
0,244	0,060	0,044	0,883

Fonte: os autores com base nos dados analisados (2025).

Modelo	Coef. não padronizados		Coef. padronizados	t	Sig.
	β	Erro std.			
Constante	0,367	0,222	---	1,648	0,102
Conectividade	0,427	0,176	0,218	2,418	0,017
Escolaridade	0,042	0,046	0,083	0,918	0,360

Dentre os preditores, apenas a conectividade foi significativa ($\beta = 0,218$; $p = 0,017$), confirmando que o acesso à infraestrutura digital é um dos principais determinantes da difusão tecnológica (Ahmad et al., 2024; Eastwood et al., 2017; Roberts et al., 2020). Esse achado corrobora a literatura que aponta a exclusão digital como barreira crítica para pequenas propriedades (Ayre et al., 2019), reforçando a necessidade de políticas públicas voltadas à expansão da conectividade rural (Savastano et al., 2024).

O grau de escolaridade, por sua vez, não apresentou efeito estatisticamente significativo ($p = 0,360$). Esse resultado contrasta com autores como Paltasingh e Goyari (2018) que identificaram a escolaridade como fator-chave na adoção tecnológica. Contudo, pode ser explicado pela homogeneidade da amostra e pela predominância de agricultores com escolaridade intermediária, somada ao papel de cooperativas e programas de extensão rural como mediadores do processo de inovação (Renzcherchen; Teixeira; Stéfani, 2022). Embora o modelo apresente baixo poder explicativo, ele evidencia empiricamente a centralidade da conectividade para a adoção da Agricultura 4.0, alinhando-se ao que destacam Gyamfi et al. (2024) quanto ao papel das tecnologias digitais em ampliar a eficiência e a sustentabilidade produtiva.

4.2 Determinantes tecnológicos e socioeconômicos da modernização agrícola

As variáveis independentes incluem o grau de escolaridade e a conectividade das propriedades. O grau de escolaridade foi mensurado a partir de uma escala adaptada do Novo Critério Padrão de Classificação Econômica Brasil (ABEP, 2024), atribuída a cada nível educacional de 0 (primeiro grau incompleto) a 6 (pós-graduação), conforme apresentado na Tabela 1. A conectividade foi operacionalizada considerando os três principais dispositivos comumente utilizados para acesso à internet (celulares, tablets e notebooks), permitindo a construção de um índice que reflete a diversidade e disponibilidade de infraestrutura digital nas propriedades. Essa abordagem possibilita

identificar o papel da infraestrutura digital na adoção tecnológica, em linha com estudos que apontam a conectividade como fator determinante para a difusão de tecnologias agrícolas e a modernização da gestão rural (Ahmad et al., 2024; Eastwood et al., 2017; Ayre et al., 2019).

Tabela 2 – Valores adaptados para grau de escolaridade com base no Novo Critério Padrão de Classificação Econômica Brasil.

Escolaridade	Valor
Primeiro grau incompleto	0
Primeiro grau completo	1
Segundo grau incompleto	2
Segundo grau completo	3
Ensino superior incompleto	4
Ensino superior completo	5
Pós-graduação	6

Fonte: os autores com base na ABEP, 2024.

A adoção tecnológica foi mensurada pelo número de dispositivos disponíveis nas propriedades (computador de bordo, piloto automático, sensores, câmeras e controle remoto), refletindo o nível de incorporação da Agricultura 4.0. O uso integrado dessas ferramentas permite maior controle de insumos, decisões mais precisas e ganhos em eficiência e produtividade (Gyamfi et al., 2024; Deng, Jing & Shen, 2022). A conectividade se mostra um fator determinante para essa adoção, especialmente em pequenas propriedades, evidenciando a interação entre fatores tecnológicos e socioeconômicos na modernização da gestão agrícola (Ahmad et al., 2024; Ayre et al., 2019; Inwood & Dale, 2019).

A variável independente conectividade foi operacionalizada considerando os três principais dispositivos comumente utilizados para acesso à internet: telefones celulares, tablets e notebooks. Os resultados desta variável apontam a infraestrutura digital como determinante da adoção tecnológica no campo (Ahmad et al., 2024; Eastwood et al., 2017), enquanto a baixa qualidade da conectividade limita especialmente pequenas propriedades (Ayre et al., 2019). O índice de conectividade utilizado evidencia que nem todos os agricultores se beneficiam igualmente da tecnologia, indicando a necessidade de políticas públicas que considerem a diversidade de dispositivos. Assim, os achados destacam a conectividade como fator central para a difusão da Agricultura 4.0.

A adoção tecnológica, medida pelo número de dispositivos utilizados nas propriedades (computador de bordo, piloto automático, sensores, câmeras e controle remoto), depende da disponibilidade e diversidade de equipamentos, assim como do conhecimento técnico dos agricultores. O uso combinado de sensores, IoT e sistemas de automação permite maior controle de insumos, decisões mais precisas e ganhos em eficiência e produtividade (Gyamfi et al., 2024; Deng, Jing & Shen, 2022).

A conectividade constitui um fator determinante para a adoção tecnológica, especialmente em pequenas propriedades, influenciando diretamente a capacidade de integração das ferramentas digitais aos processos produtivos. Esse resultado confirma a hipótese H1, em que investimentos em infraestrutura digital e programas de capacitação contínua aumentam a confiança dos agricultores e favorecem a difusão da Agricultura 4.0, mostrando que fatores tecnológicos e socioeconômicos interagem na modernização da gestão agrícola (Ahmad et al., 2024; Ayre et al., 2019; Inwood & Dale, 2019).

A análise indica que a conectividade é o principal preditor da adoção de tecnologias 4.0, enquanto o grau de escolaridade teve efeitos menos expressivos, possivelmente devido à homogeneidade da amostra ou à predominância de pequenas propriedades. Fatores tecnológicos mostram-se determinantes na difusão da Agricultura 4.0 e na modernização das práticas agrícolas. Os resultados reforçam a necessidade de políticas públicas voltadas à expansão da infraestrutura digital e à capacitação contínua dos agricultores, visando reduzir desigualdades e ampliar produtividade e sustentabilidade no meio rural.

5. Conclusões

Este estudo analisou os fatores que influenciam a adoção de tecnologias da Agricultura 4.0 por pequenos produtores de soja em Irati-PR e seu impacto na produtividade. A conectividade das propriedades foi identificada como o principal determinante da adoção tecnológica ($\beta = 0,218$; $p = 0,017$), enquanto o grau de escolaridade não apresentou efeito significativo ($p = 0,360$), possivelmente devido à homogeneidade da amostra e ao papel das cooperativas. A experiência prática dos produtores mostrou-se capaz de compensar limitações na educação formal. A adoção de tecnologias impactou positivamente a produtividade da soja, confirmando a relevância prática da conectividade e da capacitação para reduzir desigualdades e aumentar a eficiência rural.

O estudo contribui teoricamente ao quantificar a relação entre fatores socioeconômicos e tecnológicos e a produtividade, evidenciando que suporte cooperativo e experiência prática podem compensar menor escolaridade. Entre as limitações estão o uso de dados autorrelatados, a amostra restrita a um município e o baixo poder explicativo do modelo ($R^2 = 0,060$), sugerindo que outros fatores, como financiamento e políticas de extensão, também influenciam a adoção tecnológica. Pesquisas futuras devem ampliar a amostra, incluir variáveis adicionais e realizar estudos longitudinais para avaliar os impactos das tecnologias ao longo do tempo.

Referências:

- Agência de Notícias do Paraná. (2024, 19 de abril). Paraná é o estado que mais avançou em conectividade rural no último ano, segundo Anatel. Governo do Estado do Paraná. <https://www.parana.pr.gov.br/aen/Noticia/Parana-e-o-estado-que-mais-avancou-em-conectividade-rural-no-ultimo-ano-segundo-Anatel>
- Ahmad, B., Zhao, Z., Jile, X., Gultaj, H., Khan, N., & Yunxian, Y. (2024). Exploring the influence of internet technology adoption on the technical efficiency of food production: Insight from wheat farmers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1385935. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1385935>
- Amoussouhoui, R., Arouna, A., Ruzzante, S., & Banout, J. (2024). Adoption of ICT4D and its determinants: A systematic review and meta-analysis. *Heliyon*, 10(9), e30210. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30210>
- Ayre, M., Mc Collum, V., Waters, W., Samson, P., Curro, A., Nettle, R., Kruger, H., & Reichelt, N. (2019). Supporting and practising digital innovation with advisers in smart farming. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 90–91, 100302. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.05.001>

- Deng, H., Jing, X., & Shen, Z. (2022). Internet technology and green productivity in agriculture. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(54), 81441–81451. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21370-z>
- Eastwood, C., Klerkx, L., Ayre, M., & Dela Rue, B. (2017). Managing socio-ethical challenges in the development of smart farming: From a fragmented to a comprehensive approach for responsible research and innovation. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 32(5), 741–768. <https://doi.org/10.1007/s10806-017-9704-5>
- Eyike Mbongo, L. D. B., & Djoumessi, Y. F. (2024). Connecting the fields: How ICT improve agricultural productivity in sub-Saharan Africa. *Review of Development Economics*, 28(3), 888–903. <https://doi.org/10.1111/rode.13084>
- Gyamfi, E. K., ElSayed, Z., Kropczynski, J., Yakubu, M. A., & Elsayed, N. (2024). Agricultural 4.0 leveraging on technological solutions: Study for smart farming sector. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.00814>
- Inwood, S. E. E., & Dale, V. H. (2019). State of apps targeting management for sustainability of agricultural landscapes: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(1), 8. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0549-8>
- Prokopy, L. S., Floress, K., Arbuckle, J. G., Church, S. P., Eanes, F. R., Gao, Y., Gramig, B. M., Ranjan, P., & Singh, A. S. (2019). Adoption of agricultural conservation practices in the United States: Evidence from 35 years of quantitative literature. *Journal of Soil and Water Conservation*, 74(5), 520–534. <https://doi.org/10.2489/jswc.74.5.520>
- Renzcherchen, S. K., Teixeira, J. E., & Stéfani, S. R. (2022). Agriculture 4.0 and the challenges of sustainable development: A bibliometric analysis. In *International Conference on Multidimensional Sustainability: Transitions and Convergences* (pp. 133–145). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57650-8_11
- Rocha, A. (2021). Adoção de inovações digitais no agronegócio: Fatores limitantes e perspectivas (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo.
- Salvodi, A., Staduto, J. A. R., & Kreter, A. C. (2023). Fatores determinantes na adoção tecnológica em propriedades rurais do Paraná. *Revista Paranaense de Desenvolvimento*, 44(3), 87–106.
- Savastano, M., Samo, A. H., Abdullah, U., & Cucari, N. (2025). Toward sustainable smart agriculture in a developing country: An empirical analysis of green firms determinants. *Business Ethics, the Environment & Responsibility*, 33(1), 127–146. <https://doi.org/10.1111/beer.12746>
- Salvodi, A., Staduto, J. A. R., & Kreter, A. C. (2023). Adoção da Agricultura 4.0: Um estudo sobre os produtores de soja da região Oeste do Paraná. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, e27282-e27282. <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2023.v40.27282>