UM MAPA DE PRODUTIVIDADE CONTA TODA A HISTÓRIA? COMO OS PADRÕES ESPAÇO-TEMPORAIS AJUDAM A COMPREENDER, DECIDIR E VALIDAR A GESTÃO AGRÍCOLA

Ricardo Canal Filho[1]; José Paulo Molin[1]

[1] Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP)

Compreender

Um mapa de produtividade é como uma fotografia da lavoura em determinada safra. Ele mostra como a produção se distribuiu espacialmente, permitindo reconhecer diferenças e levantar hipóteses sobre suas possíveis causas. Entretanto, essa fotografia representa apenas o resultado daquele ciclo produtivo, condicionado pelas interações entre solo, planta, clima e manejo. Para compreender como essas diferenças se organizam e se modificam ao longo do tempo, precisamos olhar além de uma única safra. Trazemos dois exemplos que ajudam a demonstrar por quê.

Em uma lavoura de café na região de Patos de Minas (MG), acompanhada durante três safras, o primeiro mapa sugeria a existência de regiões com diferentes potenciais produtivos. Entretanto, na safra seguinte, a ordenação espacial se inverteu: as regiões anteriormente mais produtivas passaram a apresentar menores rendimentos, e vice-versa. Com a terceira safra, tornou-se possível reconhecer que essa alternância estava relacionada à bienalidade produtiva do cafeeiro, com diferentes porções da mesma lavoura apresentando fases opostas de produção, apesar de terem sido implantadas no mesmo ano e submetidas a manejo uniforme (Figura 1). Nessa área, o histórico permitiu distinguir diferenças de potencial produtivo da alternância fisiológica da bienalidade. Além de demonstrar que um mapa de produtividade pode servir para mais do que simplesmente quantificar a produção, percebemos que uma decisão baseada apenas no primeiro ano confundiria uma condição temporária da cultura com uma característica permanente da área.

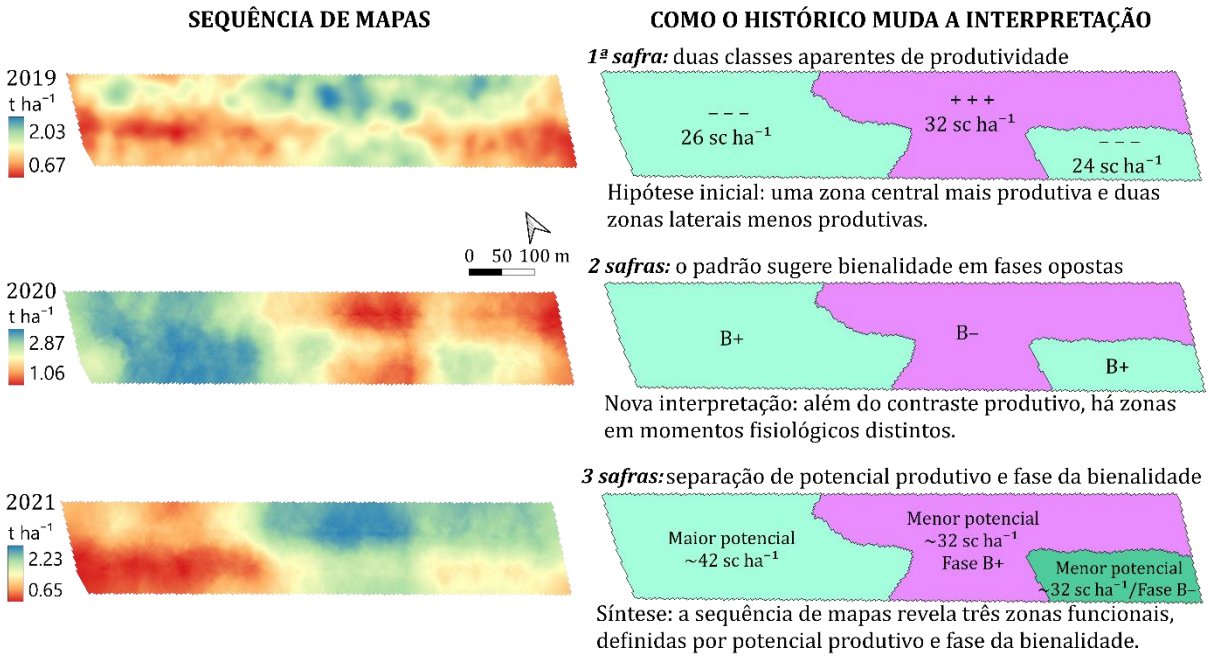


Figura 1. *Evolução da interpretação agronômica dos padrões espaço-temporais de produtividade em uma lavoura de café na região de Patos de Minas (MG), ao longo de três safras (2019–2021). À esquerda, mapas de produtividade de cada safra; à direita, a interpretação progressiva dos padrões observados. B+: bienalidade positiva; B–: bienalidade negativa.*

As séries históricas também revelam como as diferenças produtivas podem mudar entre safras. Em uma lavoura de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, foram delineadas duas zonas de produtividade, alta e baixa (Figura 2). Ao longo de cinco safras, a zona de alta manteve sua vantagem produtiva, mas a magnitude dessa diferença variou de aproximadamente 5% a 20%. Essa variação apresentou associações com condições climáticas, incluindo o déficit de pressão de vapor e indicadores de disponibilidade hídrica. Assim, embora as regiões mais e menos produtivas tenham permanecido relativamente consistentes, a intensidade desse contraste mudou entre safras. Para o gestor, isso significa que o contraste observado em um único mapa pode superestimar ou subestimar as diferenças produtivas esperadas nos anos seguintes.

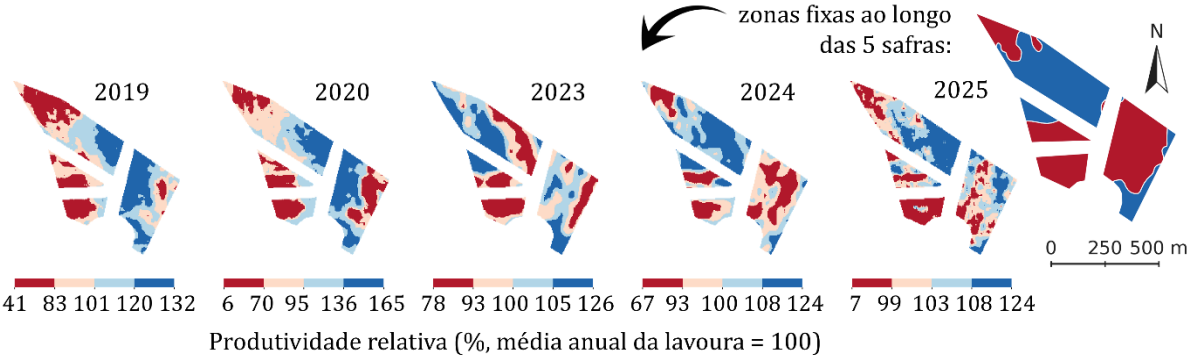


Figura 2. *Variação espaço-temporal da produtividade relativa em uma lavoura de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, ao longo de cinco safras (2019, 2020, 2023, 2024 e 2025). Os mapas apresentam a produtividade relativa à média de cada safra (100%), com escalas de cores específicas para cada ano. À direita, são apresentadas as zonas de alta e baixa produtividade definidas a partir do histórico, evidenciando a persistência dos padrões espaciais apesar das variações anuais em sua intensidade*

Esses exemplos mostram que séries históricas, sobretudo quando representam diferentes condições de produção, permitem compreender aspectos da variabilidade que

uma única safra não revela. Mas reconhecer padrões é apenas parte do caminho. Uma vez identificadas essas diferenças, quais delas realmente merecem, e permitem, uma intervenção?

Decidir

Compreender os padrões espaço-temporais de produtividade é importante, mas como transformar esse conhecimento em decisões práticas? Taylor et al. (2021) chamam a atenção para o conceito de zonas de decisão: mais do que identificar regiões diferentes dentro de uma lavoura, precisamos compreender no que se deseja intervir. Essa discussão se relaciona ao conceito de actionability, ou seja, à possibilidade de transformar a variabilidade identificada nos mapas em ações relevantes e operacionalmente viáveis.

Em um estudo com 255 lavouras de cana-de-açúcar, totalizando aproximadamente 15 mil hectares no estado de São Paulo, investigamos essa questão a partir de recomendações de reposição de nutrientes baseadas no histórico de produtividade de unidades de gestão diferenciada (UGDs), também denominadas zonas de manejo. Para ilustrar o que será abordado, considere, primeiro, duas lavouras com diferentes padrões espaciais (Figura 3A). Uma lavoura foi dividida em três UGDs, que apresentaram produtividades de 101, 103 e 125 t/ha. As duas primeiras, embora localizadas em regiões distintas da lavoura e potencialmente sujeitas a diferentes condições de solo, apresentam produtividades muito semelhantes. Essa separação espacial pode continuar sendo relevante para outras decisões agronômicas, mas, em uma estratégia de reposição proporcional à produtividade, a diferença de apenas 2 t/ha dificilmente justificaria recomendações distintas. Nesse caso, faria sentido considerar duas doses de reposição: uma para as UGDs de menor potencial produtivo e outra para a UGD com potencial aproximadamente 20% superior. Já na segunda lavoura, com duas UGDs de 84 e 89 t/ha, a questão é outra: a pequena diferença entre elas justificaria diferenciar a adubação ou seria mais adequado adotar uma recomendação uniforme com base na média da lavoura, de 86 t/ha? A questão, portanto, não é apenas onde delimitar UGDs, mas quando as diferenças entre elas justificam decisões distintas.

Com isso em mente, avançamos para o resultado mais interessante deste trabalho, que apareceu na análise conjunta das 255 lavouras. Em todas as áreas, a recomendação de fertilizantes seguiu o padrão determinado pelos gestores, em uma estratégia de adubação por reposição do extraído com base nos mapas de produtividade. Dois cenários foram comparados: (i) adubação uniforme, pela média produtiva da lavoura; (ii) adubação por zonas, aqui denominadas UGDs, com base na média de produtividade da zona. Para cada UGD, a diferença entre as duas estratégias foi quantificada, fosse positiva (déficit da adubação uniforme) ou negativa (excesso da adubação uniforme). Ao final, somou-se o total de fertilizante recomendado pela estratégia uniforme e o total recomendado pela adubação por zonas. A divergência absoluta (seja déficit ou excesso) entre as duas estratégias totalizou 157, 196, e 177 t de fertilizante em 2023, e 151, 188, e 170 t em 2024 (para nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente).

Entretanto, em mais da metade dos aproximadamente 15 mil hectares avaliados, as recomendações por UGDs diferiram menos de 5% da recomendação uniforme (Figura 3B). Ou seja, em grande parte da área, a diferenciação espacial pouco alteraria a quantidade de fertilizante recomendada. Por outro lado, essas mesmas UGDs que diferiam em menos de 5% em relação à adubação uniforme responderam por apenas um quarto da diferença total na alocação de fertilizantes entre as duas estratégias (Figura 3C). Isso significa que a maior parte dessa diferença estava concentrada em uma parcela menor da área: UGDs onde os contrastes produtivos com a média da lavoura eram mais expressivos. Assim, identificar variabilidade espacial não significa, necessariamente, encontrar oportunidades igualmente relevantes para diferenciar a gestão.

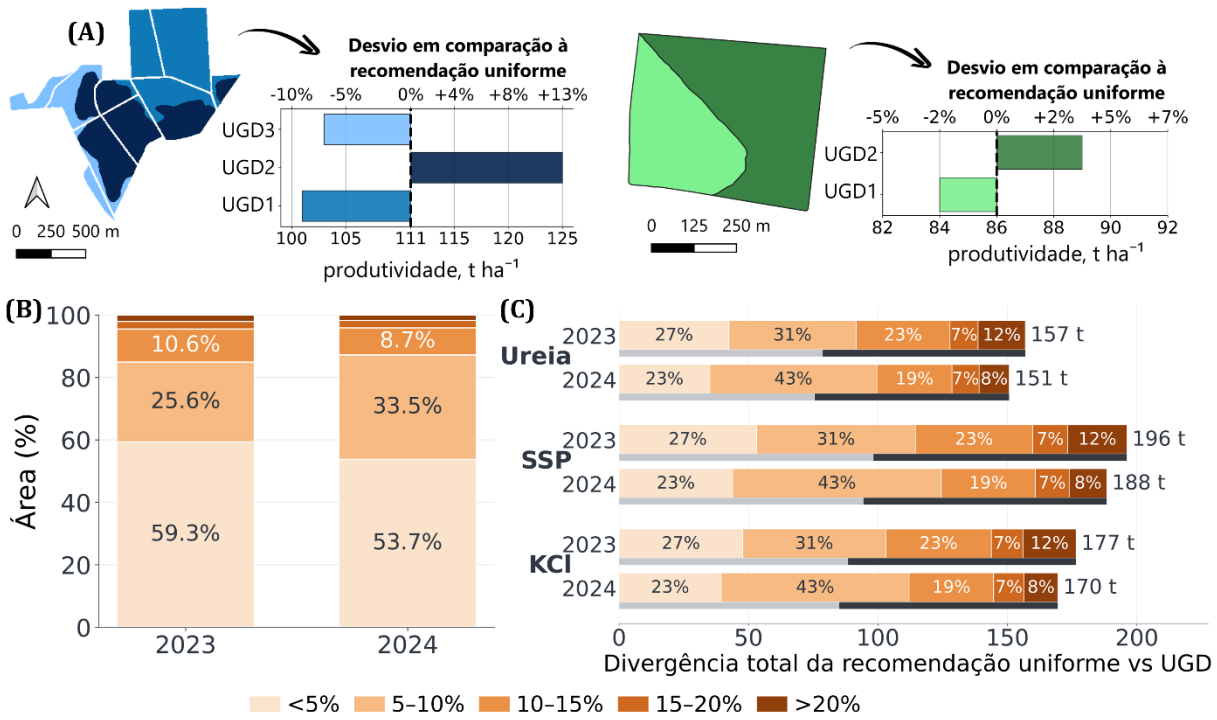


Figura 3. *Relevância dos padrões de produtividade para a diferenciação da reposição de nutrientes em lavouras de cana-de-açúcar. (A) Duas lavouras com diferentes contrastes produtivos entre UGDs e respectivos desvios em relação à recomendação uniforme. (B) Percentual da área conforme a diferença entre as recomendações por UGDs e uniforme, nas safras de 2023 e 2024. (C) Participação dessas classes na diferença total de alocação de fertilizantes entre as duas estratégias, expressa em toneladas equivalentes de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio. Adaptado de Canal Filho et al. (2026a).*

A distinção entre variabilidade mensurável e variabilidade que merece intervenção é especialmente importante porque estudos em diferentes países apontam a percepção de benefícios concretos como um fator relevante para a adoção e a confiança nas tecnologias de agricultura de precisão (Gabriel e Gandorfer, 2023; Han et al., 2026; Mitchell et al., 2021; Tibbs et al., 2026). Recomendar intervenções cujos benefícios dificilmente possam ser percebidos pode comprometer essa confiança. Cabe ao profissional comunicar não apenas as diferenças identificadas, mas também sua relevância para a decisão pretendida.

Além disso, nem toda variabilidade detectável pode ser manejada com a mesma precisão. Considere outro exemplo com cana-de-açúcar: as falhas nas fileiras de cana. Estas podem ser identificadas espacialmente, com seu impacto econômico e operacional quantificados (Silva et al., 2026). Mas nem sempre os equipamentos disponíveis permitem interromper ou adaptar os tratos culturais nesses locais. A capacidade de detectar a variabilidade nem sempre corresponde à capacidade de agir sobre ela. Portanto, os padrões de produtividade devem ser interpretados considerando tanto os objetivos do produtor quanto as possibilidades reais de intervenção. E isso nos leva à mais natural de todas as perguntas que surge quando avaliamos padrões espaço-temporais da produtividade: quais fatores estão associados às diferenças produtivas que desejamos manejar?

Investigar e validar

Reconhecer diferenças produtivas e avaliar sua relevância para o manejo são etapas importantes, mas ainda precisamos compreender quais fatores podem estar associados a esses padrões. Nesse contexto, as séries históricas de produtividade oferecem mais do que uma base para delimitar zonas na lavoura: elas ajudam a identificar onde investigar e quais perguntas agronômicas merecem atenção. Afinal, conhecer uma região

de baixa produtividade não significa conhecer as razões de seu desempenho.

Em um estudo recente com duas lavouras comerciais de cana-de-açúcar, utilizamos padrões de produtividade observados em safras consecutivas para delimitar cada lavoura em uma zona de alta e uma zona de baixa produtividade. Essas zonas orientaram uma investigação multidimensional da saúde do solo (Figura 4, Canal Filho et al., 2026b). A química foi dividida em um índice que representava o pH, capacidade de troca catiônica, soma de bases, teor de alumínio, magnésio e cálcio, e um índice que representava o teor de fósforo e potássio do solo (Nutrientes). Além dos atributos químicos, que são tradicionalmente avaliados, foram consideradas as dimensões física e biológica do solo. O diagnóstico revelou associações mais consistentes entre a dimensão química e as zonas produtivas, enquanto os indicadores físicos apresentaram condições favoráveis, inclusive nas regiões de menor produtividade. Já a dimensão biológica apresentou condições que merecem atenção em ambas as zonas. Assim, a investigação permitiu identificar tanto atributos associados aos contrastes produtivos quanto condições que poderiam representar prioridades de manejo para toda a lavoura.

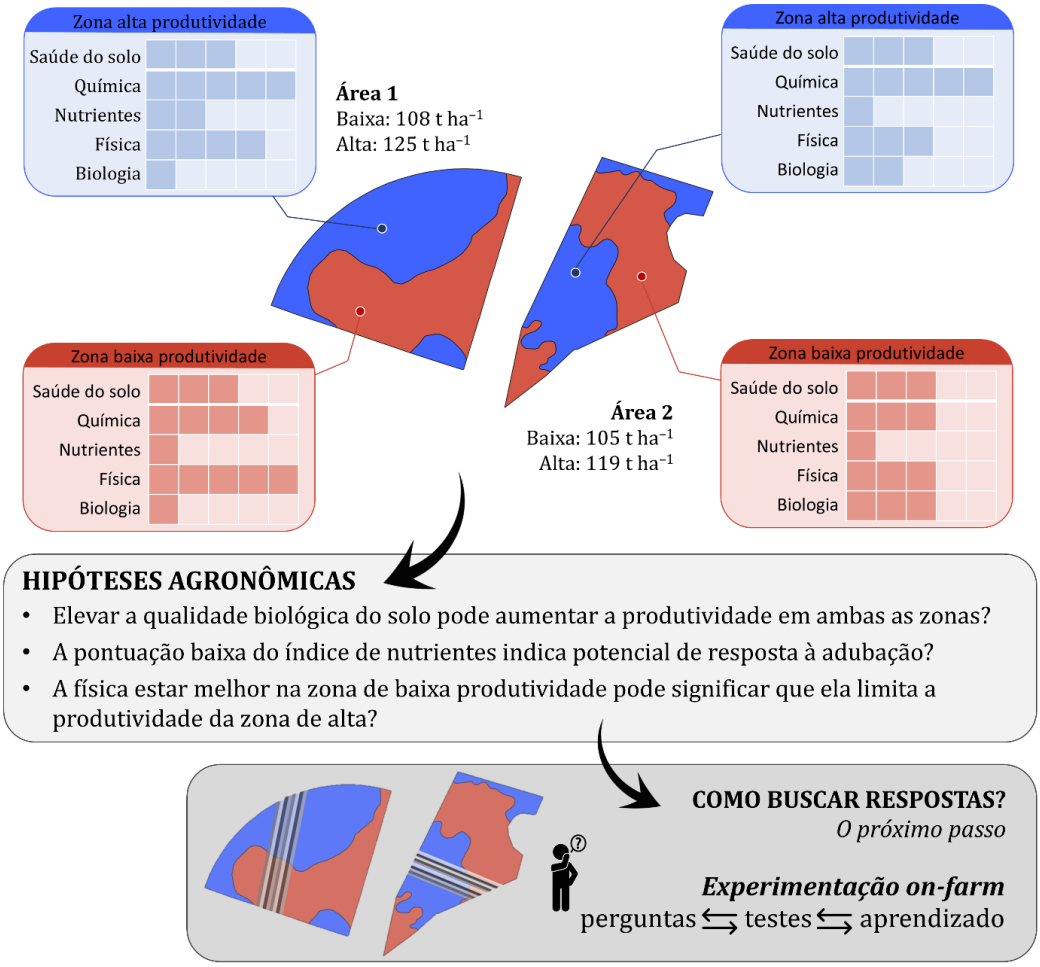


Figura 4. *Aplicação dos padrões espaço-temporais de produtividade no diagnóstico agronômico e na formulação de hipóteses de manejo em duas lavouras de cana-de-açúcar. As zonas de alta (azul) e baixa (vermelho) produtividade orientaram a avaliação multidimensional da saúde do solo, representada por índices normalizados de 0 a 1. As hipóteses ilustram possíveis intervenções a serem investigadas, enquanto as faixas experimentais representam conceitualmente sua validação por meio de experimentação na própria lavoura (experimentação on-farm). Adaptado de Canal Filho et al. (2026b).*

Esse exemplo ilustra uma aplicação importante dos padrões espaço-temporais: transformar diferenças observadas nos mapas em hipóteses agronômicas mais específicas. Uma condição desfavorável do solo não explica necessariamente a menor produtividade de determinada zona, assim como uma associação entre atributos e produtividade não demonstra uma relação de causa e efeito. Entretanto, essas informações ajudam a identificar possíveis limitações e selecionar intervenções que merecem ser avaliadas.

É nesse ponto que a experimentação conduzida na própria lavoura se torna uma continuidade natural do processo. A experimentação on-farm, tema tratado na primeira edição do Boletim de Divulgação Técnica da AsBraAP (Colaço, 2026), permite testar intervenções em zonas com características distintas para avaliar suas respostas produtivas e econômicas, verificando quais práticas oferecem benefícios reais nas condições do produtor. Além de gerar evidências para aprimorar o manejo, essa abordagem aproxima o agricultor do processo de investigação e torna os resultados das recomendações mais transparentes e verificáveis.

Talvez o maior valor dos mapas de produtividade não esteja apenas em mostrar onde a lavoura produz mais ou menos, mas em nos ajudar a formular perguntas melhores: por que essas diferenças existem? Quais delas merecem intervenção? Como podemos verificar se nossas decisões realmente funcionam? Compreender os padrões, decidir com propósito e investigar suas causas transformam o histórico de produtividade em uma ferramenta de aprendizado contínuo para a gestão agrícola.

Referências

Canal Filho, R., Molin, J.P., Sterle, L.G.G., Ferraz, V.A., 2026a. What 255 sugarcane farms and 15,000 ha reveal about sustainable nutrient management. Proceedings of the 17th International Conference on Precision Agriculture. Porto Alegre, Brazil.

Canal Filho, R., Molin, J.P., Cherubin, M.R., Otto, R., Sanches, G.M., 2026b. Soil health as a driver of yield patterns and management. Proceedings of the 23rd World Congress of Soil Science, 2026. Nanjing, China.

Colaço, A.F. Experimentação on-farm: conceitos e aplicações na tomada de decisão agronômica. Boletim de Divulgação Técnica, Associação Brasileira de Agricultura de Precisão e Digital (AsBraAP), ano 1, n. 1, p. 9–13, ago. 2026.

Gabriel, A., Gandorfer, M., 2023. Adoption of digital technologies in agriculture—an inventory in a European small-scale farming region. Precis. Agric. 24, 68–91.

Han, G., Wang, J., Arbuckle, J.G., Zhong, J., 2026. Understanding the adoption of precision agriculture technologies by farmers in China: insights from the unified theory of acceptance and use of technology. Agric. Syst. 231, 104549. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104549

Martello, M., Molin, J.P., Bazame, H. C., 2022. Obtaining and validating high-density coffee yield data. Horticulturae, 8, 5, 421. https://doi.org/10.3390/horticulturae8050421

Mitchell, S., Weersink, A., Bannon, N., 2021. Adoption barriers for precision agriculture technologies in Canadian crop production. Can. J. Plant Sci. 101 (3), 412–416. https://doi.org/10.1139/cjps-2020-0234

Silva, E.R.O., Molin, J.P., Canal Filho, R., Wei, M.C.F., 2026. Row gaps as drivers of economic damage in sugarcane fields. Bio Engin, 271, 104563. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2026.104563

Taylor, J.A., Bates, T.R., Manfrini, L., Guillaume, S., 2021. Zoning and data fusion in precision horticulture: current and needed capabilities to assist decision-making. Acta Hortic. 1314, 173–188. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1314.23

Tibbs, R.G., Heller, N.J., Bullock, D.S., Boerngen, M.A., 2026. Midwestern farmers' willingness to engage with precision agriculture technologies and on-farm precision experimentation. Agron. J. 118 (3), e70377. https://doi.org/10.1002/agj2.70377