Machine Translated by Google
RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar: O Conhecimento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | Submissão: 23 de outubro de 2026 | Aceito: 28 de outubro de 2026 | Publicação: 2 de novembro de 2026

Integração gradual de tecnologias de agricultura de precisão em fazendas de médio porte em Texas: Um modelo tecnoeconômico para ganhos de eficiência.

Integração gradual de tecnologias de agricultura de precisão em fazendas de médio porte no Texas: uma estrutura técnico-econômica para ganhos de eficiência.

Integração gradual de tecnologias de agricultura de precisão em fazendas de médio porte.
Texas: uma estrutura tecnoeconômica para ganhos de eficiência

Walter Luiz Ribeiro Adriano

Bacharel em Ciências Agrárias (Agronomia), Universidade Federal de Goiás – UFG, 2009
Fundador e Consultor Principal da Walter's Agribusiness Consulting, LLC (WA Consulting)
Condado de Bexar, Texas, Estados Unidos
E-mail: walterluizadriano@gmail.com

RESUMO

Contexto. As tecnologias de agricultura de precisão (AP) — orientação por GPS, controle de seções, sensoriamento de umidade do solo, aplicação em taxa variável (ATV) e monitoramento aéreo não tripulado — são tecnicamente maduras, mas sua adoção permanece desigual entre os diferentes tamanhos de propriedades rurais nos EUA. As operações comerciais de médio porte, com aproximadamente 200 a 1.500 acres, comuns no centro-sul do Texas, frequentemente carecem de equipe técnica dedicada e enfrentam restrições de capital e de aprendizado que retardam a adoção dessas tecnologias. **Objetivo.** Este artigo desenvolve e avalia uma estrutura de integração gradual, concebida para reduzir os limiares de capital e conhecimento enfrentados por essas fazendas, ao mesmo tempo que produz ganhos mensuráveis em eficiência de insumos e estabilidade de rendimento em duas a três safras. **Métodos.** A análise combina uma revisão estruturada de evidências publicadas sobre adoção e rentabilidade (Serviço de Pesquisa Econômica do USDA e literatura revisada por pares) com um modelo técnico-econômico de uma fazenda representativa de 600 acres com cultivo misto na região do Condado de Bexar. As estratégias de adoção gradual e simultânea são comparadas com base no fluxo de caixa acumulado, no retorno simples do investimento, no valor presente líquido (VPL) e na sensibilidade a preços-chave e respostas agronômicas.
Resultados. Sob as premissas do cenário base, a integração faseada mantém a exposição máxima de capital abaixo de US$ 6.000, atinge fluxo de caixa acumulado positivo no terceiro ano e gera um VPL (Valor Presente Líquido) maior do que a compra de um pacote completo à vista (cerca de US$ 30.700 contra US$ 20.300), apresentando um risco de perda muito menor. As reduções esperadas nos custos de insumos, de 8% a 15%, estão em consonância com as faixas publicadas.
O retorno do investimento é mais sensível aos preços do nitrogênio e à resposta de produtividade obtida com prescrições de taxa variável. **Conclusões.** O sequenciamento de ferramentas de diagnóstico em primeiro lugar, o direcionamento e o controle seccional em segundo, e o monitoramento baseado em imagens em terceiro — apoiados por consultoria que integra diagnóstico agronômico, modelagem financeira e treinamento de operadores — tornam a agricultura de precisão acessível e lucrativa para fazendas de médio porte no Texas e contribuem para objetivos nacionais mais amplos de eficiência no uso de recursos.
Palavras-chave: agricultura de precisão; sensores de umidade do solo; orientação por GPS; tecnologia de taxa variável; sistemas aéreos não tripulados; propriedades rurais de médio porte; análise técnico-econômica; Texas; consultoria em agronegócio

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão refere-se a um conjunto de práticas de gestão intensivas em informação que utilizam Dados de localização, sensores e regras de decisão para adequar as entradas à variabilidade espacial e temporal encontrada. dentro dos campos. Desde a comercialização de monitores de rendimento e GPS diferencial na década de 1990, o A tecnologia foi expandida para incluir direção automática cinemática em tempo real (RTK) e seção automática. controle em pulverizadores e plantadeiras, semeadura e fertilização em taxa variável, umidade do solo no campo telemetria e, mais recentemente, imagens multiespectrais coletadas por pequenos sistemas aéreos não tripulados.

Este artigo é publicado em acesso aberto sob a licença Creative Commons Attribution, que permite o uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.

Machine Translated by Google
O Conhecimento Multidisciplinar
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | Submissão: 23 de outubro de 2026 | Aceito: 28 de outubro de 2026 | Publicação: 2 de novembro de 2026

(drones). Cada componente está disponível comercialmente, com preço competitivo e suporte do revendedor.

redes em todo o Texas. No entanto, as evidências nacionais mostram que a adoção é fortemente estratificada por tipo de propriedade rural.

Tamanho: grandes operações adotam mais cedo e de forma mais completa, enquanto fazendas de médio porte adotam seletivamente e

frequentemente param após o primeiro componente (Schimmelpfennig, 2016; McFadden, Njuki & Griffin, 2023).

A persistência dessa lacuna é importante por dois motivos. Primeiro, as operações de médio porte gerenciam uma quantidade substancial de recursos.

participação das terras agrícolas no Texas e nos Estados Unidos como um todo. Se eles ficarem para trás na adoção de práticas que economizam insumos

tecnologia, os ganhos agregados em eficiência de fertilizantes, combustíveis, água e pesticidas que a precisão

A produção agrícola que pode ser produzida será correspondentemente menor. Em segundo lugar, as fazendas de médio porte são precisamente as

operações para as quais a eficiência de custos é mais importante: elas são grandes o suficiente para depender de

margens comerciais muito pequenas para absorver anos repetidos de retornos baixos. Uma tecnologia que reduz

Uma redução de apenas dez por cento nos custos de produção pode representar a diferença entre reinvestimento e contração.

A região centro-sul do Texas ilustra bem esse desafio. As fazendas dentro e ao redor do Condado de Bexar operam sob

um clima semiárido a subúmido, com alta demanda evaporativa, chuvas irregulares e solos que variam

desde solos argilosos profundos até perfis calcários rasos em curtas distâncias. Misturas de culturas comuns

Combinar sorgo granífero, milho, algodão, trigo e forragem, frequentemente integrados com gado. Irrigação,

Quando disponíveis, dependem dos recursos hídricos subterrâneos sujeitos à gestão regional — o Edwards

A Autoridade de Aquíferos regula a extração de água do Aquífero Edwards — e os custos de energia para

bombeamento. Essa combinação de variabilidade dentro do campo, escassez de água e empreendimentos diversificados é

exatamente o contexto em que as tecnologias de precisão devem compensar. É também um contexto em que os genéricos

As recomendações falham, porque o valor de qualquer componente depende dos solos locais, da rotação de culturas e

Equipamentos já presentes na fazenda.

Este artigo aborda uma questão prática: **como uma fazenda de médio porte no Texas pode sequenciar a adoção?**

de componentes de agricultura de precisão, de forma que cada etapa se pague, construa dados e desenvolva habilidades.

necessário para o próximo passo, e mantém o risco financeiro dentro da tolerância de uma empresa familiar.

operações? A contribuição é tripla. Primeiro, o artigo sintetiza a adoção e a rentabilidade.

evidências relevantes para propriedades rurais de médio porte. Em segundo lugar, propõe um modelo de integração em três fases.

com critérios de decisão explícitos. Terceiro, avalia a estrutura com uma abordagem técnico-econômica transparente.

modelo de uma fazenda representativa de 600 acres, incluindo análise de sensibilidade, para que consultores e

Os produtores podem adaptar os cálculos às suas próprias condições.

Este artigo é publicado em acesso aberto sob a licença Creative Commons Attribution, que permite o uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.

Machine Translated by Google
Revista Científica Multidisciplinar: O Conhecimento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

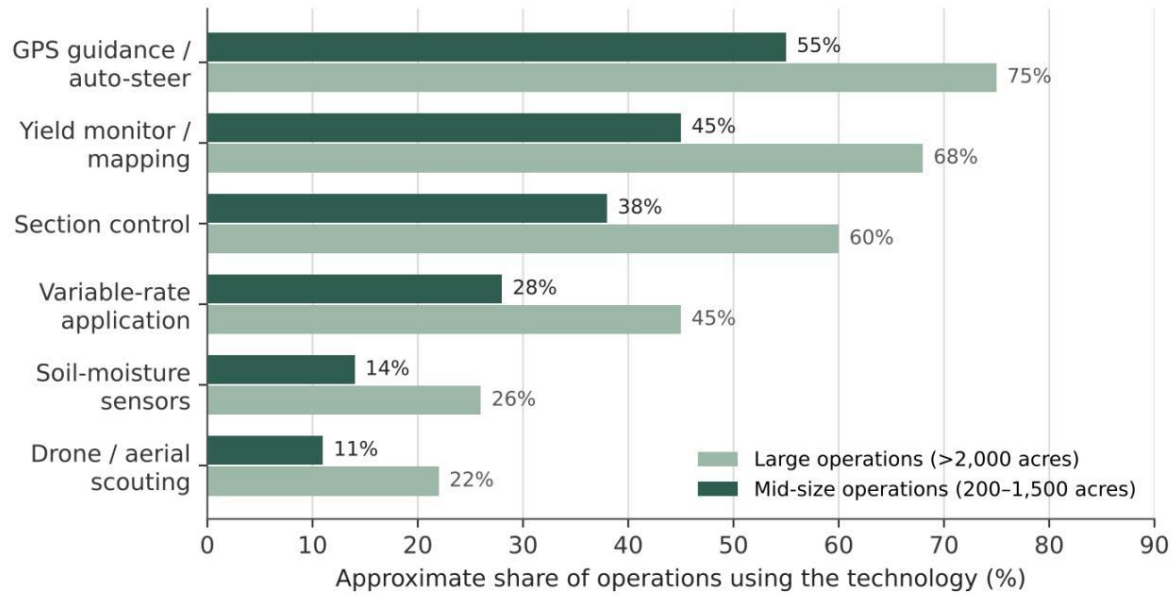
Ano VII, v.2 2026 | Submissão: 23 de outubro de 2026 | Aceito: 28 de outubro de 2026 | Publicação: 2 de novembro de 2026

2. CONTEXTO E LITERATURA

2.1 Padrões de adoção por tecnologia

O Inquérito de Gestão de Recursos Agrícolas (ARMS, na sigla em inglês) do USDA fornece a informação mais consistente.
dados nacionais sobre o uso de tecnologia de precisão. Análises sucessivas do ERS mostram que a orientação e a automação
Os sistemas de direção se difundiram mais rapidamente, atingindo a maioria das áreas plantadas para as principais culturas agrícolas, porque
Seus benefícios incluem menor sobreposição de funções, menor fadiga do operador, jornadas de trabalho mais longas e economia de combustível.
são imediatas, visíveis e em grande parte independentes da interpretação agronômica (Schimmelpfennig, 2016;
McFadden et al., 2023). Seguiu-se o monitoramento e mapeamento da produtividade, embora muitas fazendas coletem dados de produtividade.
dados sem usá-los para gerenciar mudanças. A tecnologia de taxa variável (VRT) se difundiu mais
A aplicação é lenta e frequente, realizada por meio de aplicadores terceirizados e serviços agronômicos de varejo.
do que equipamentos próprios (Erickson & Lowenberg-DeBoer, 2020). Sensores de umidade do solo em campo e
O monitoramento por drones continua sendo o componente menos adotado, concentrado em culturas especiais e irrigadas.
sistemas e grandes operações.

Figura 1 – Taxas aproximadas de adoção de tecnologias selecionadas de agricultura de precisão por
Classe de tamanho de operação nos Estados Unidos. Compilado pelo autor e arredondado a partir do USDA ERS.
Análises e pesquisas do setor, 2016–2023; os valores são indicativos e destinados à comparação.
em diferentes tecnologias, em vez de estimativas precisas.



A Figura 1 resume o padrão geral. Duas características são importantes para a estrutura desenvolvida.
Aqui. Primeiro, a classificação das tecnologias é semelhante para fazendas de médio e grande porte; o que difere é o nível.

Este artigo é publicado em acesso aberto sob a licença Creative Commons Attribution, que permite o uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio.
médio, desde que a obra original seja devidamente citada.

Machine Translated by Google
Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | Submissão: 23 de outubro de 2026 | Aceito: 28 de outubro de 2026 | Publicação: 2 de novembro de 2026

de adoção. Isso implica que as barreiras enfrentadas pelas fazendas de médio porte não estão primariamente relacionadas à tecnologia.
A adequação diz respeito às condições em que a adoção ocorre. Em segundo lugar, a diferença entre as classes de tamanho.
é proporcionalmente maior para as tecnologias que exigem interpretação de dados — VRT, sensores e
drones — e menores para orientação, que funcionam "prontos para uso".

2.2 Evidências de rentabilidade

Estudos sobre a economia da agricultura de precisão em nível de propriedade rural relatam retornos positivos, porém heterogêneos.
Griffin, Shockley e Mark (2018) resumem a literatura econômica e concluem que a orientação
e o controle seccional demonstra os benefícios líquidos mais consistentes, tipicamente por meio de reduções de 5 a 15%.
percentagem de sobreposição de sementes, fertilizantes e produtos fitossanitários, bem como economia de combustível e mão de obra.
Os retornos da fertilização em taxa variável são mais variáveis: são mais fortes onde há variabilidade dentro do campo.
onde o potencial de rendimento é grande e estável ao longo do tempo e onde o agricultor possui os dados de solo e de produtividade necessários.
para construir zonas de gestão defensáveis. Schimmelpfennig (2016) constatou que a adoção de precisão
As tecnologias estiveram associadas a aumentos modestos no lucro operacional, com efeitos maiores em empresas de maior porte.
fazendas, um resultado atribuível em parte à capacidade de distribuir os custos fixos por uma área maior.
Lowenberg-DeBoer e Erickson (2019) enfatizam que a justificativa econômica para a agricultura de precisão é evidente.
Muitas vezes, os benefícios são subestimados em estudos que analisam uma tecnologia isoladamente. Muitos benefícios são...
Complementar: O sistema de orientação por GPS proporciona a precisão posicional necessária para o controle de seção e o VRA (Vertical Rigorized Area - Área de Referência Variável);
A amostragem do solo e os mapas de produtividade criam a base de informações para as prescrições; e as imagens são a principal ferramenta.
É valioso quando pode ser interpretado em conjunto com os mapas de zoneamento existentes. Essa complementaridade é fundamental para
a lógica de escalonamento proposta na Seção 4.

2.3 Por que as fazendas de médio porte ficam para trás

A literatura e a experiência de campo apontam para três categorias sobrepostas de barreiras: **capital e escala.**
As barreiras surgem porque muitos componentes de precisão têm um custo fixo que é distribuído por uma área menor.
Em uma fazenda de médio porte, surgem **barreiras de conhecimento e tempo,** pois o operador geralmente está simultaneamente envolvido em diversas tarefas.
O gerente, o operador de equipamentos e o profissional de marketing; há pouco tempo para aprender um novo software.
calibrar sensores ou interpretar mapas. **Barreiras de evidência** surgem porque os produtores razoavelmente descontam
Os fornecedores alegam e procuram retornos comprovados em fazendas semelhantes às suas, em solos locais e
clima. Notavelmente, nenhuma dessas barreiras se refere à existência de tecnologia adequada. Elas dizem respeito a...
Sequenciamento, interpretação e demonstração — funções que consultores agrícolas e extensionistas desempenham.
Os serviços estão bem posicionados para fornecer (Anderson & Feder, 2007).

Este artigo é publicado em acesso aberto sob a licença Creative Commons Attribution, que permite o uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.

Machine Translated by Google
RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar: O Conhecimento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | Submissão: 23 de outubro de 2026 | Aceito: 28 de outubro de 2026 | Publicação: 2 de novembro de 2026

Tabela 1 – Principais barreiras à adoção em propriedades rurais de médio porte e as respectivas respostas de projeto.

no quadro escalonado

Categoria de barreira	Como isso se manifesta em tamanho médio Fazendas do Texas	Resposta de design dentro da estrutura
Capital e escala	Alto custo fixo por hectare; relutância em financiar equipamentos em um cenário de incerteza. retornos	Comece com diagnósticos de baixo custo; utilize serviços personalizados para VRA; faça adaptações. em vez de substituir
Conhecimento e tempo	Sem equipe técnica dedicada; a responsabilidade pelo software e pela calibração recai sobre o... operador	Configuração conduzida por consultor, treinamento rápido para o operador, uma regra de decisão por ferramenta.
Evidências e confiança	Ceticismo em relação às alegações dos fornecedores; necessidade de comprovação local e específica para cada fazenda.	Cálculo simplificado do retorno do investimento por fase; comparações em faixas de cultivo na propriedade; resultados documentados.
Integração de dados	Dados de dispositivos diferentes não estão vinculados; Mapas de produtividade coletados, mas não utilizados.	camada única de limite de campo e zona estabelecido na Fase 1 e reutilizado em fases posteriores

3 MÉTODOS

3.1 Desenho da pesquisa

O estudo utiliza uma abordagem mista comum na economia agrícola aplicada: uma síntese estruturada.
de evidências secundárias combinadas com um modelo tecnoeconômico determinístico de um representante
fazenda. O método da fazenda representativa é amplamente utilizado pela Texas A&M AgriLife e pelas universidades públicas de pesquisa agrícola.
instituições para avaliar opções de políticas e tecnologias, porque permite suposições transparentes de que
Os produtores individuais podem substituir os dados pelos seus próprios. Os parâmetros do modelo foram extraídos de publicações.
As fontes utilizadas foram as disponíveis, bem como a experiência prática do autor na gestão e consultoria de negócios.
operações no Brasil e no Texas, e são deliberadamente conservadoras.

3.2 Fazenda representativa

A fazenda representativa é uma operação de cultivo misto de 600 acres na região do Condado de Bexar. Ela planta
aproximadamente 250 acres de sorgo granífero, 150 acres de milho, 120 acres de trigo de inverno e 80 acres
de algodão em um ano típico, com 160 acres irrigados por um pivô central abastecido por água subterrânea.
O operador possui um trator de 150 cavalos de potência, uma plantadeira de 12 linhas, um pulverizador autopropelido de 18 metros e um
todas as árvores têm entre oito e quinze anos. O fertilizante é espalhado por um revendedor local que oferece

Este artigo é publicado em acesso aberto sob a licença Creative Commons Attribution, que permite o uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.

Machine Translated by Google
Revista Ibero-Americana do Conhecimento Multidisciplinar
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | Submissão: 23 de outubro de 2026 | Aceito: 28 de outubro de 2026 | Publicação: 2 de novembro de 2026

aplicação de taxa variável como serviço personalizado. A fazenda emprega o proprietário-operador, um funcionário em tempo integral.

Empregados e trabalhadores sazonais durante a colheita.

Tabela 2 – Parâmetros do caso base da fazenda representativa de 600 acres

Parâmetro	Valor base	Fonte/nota
Área total cultivada	600 acres	Definição representativa de fazenda
Área irrigada (pivô central)	160 acres	Típico de regiões com acesso a águas subterrâneas.
gasto anual de nitrogênio	USD 42.000	US$ 70/acre em média para todas as culturas
Despesas anuais com sementes, herbicidas e inseticidas	USD 78.000	Aproximadamente USD 130 por acre em média
Combustível anual para operações de campo	USD 14.500	Diesel para lavoura, plantio, pulverização e colheita.
Energia de bombeamento anual (área irrigada)	USD 16.000	Bombeamento elétrico, US$ 100 por acre irrigado
Sobreposição entre plantadeira e pulverizador sem controle	7%	Faixa intermediária das estimativas publicadas para campos irregulares
Taxa de desconto	7%	Estimativa do custo de capital da fazenda.
Horizonte de análise	6 anos	Vida útil típica de componentes eletrônicos antes da atualização.

3.3 Componentes e custos da tecnologia

O modelo considera cinco componentes: (i) amostragem de solo em grade ou zona com análise laboratorial; (ii)

quatro a seis sondas capacitivas de umidade do solo com telemetria para a área irrigada e

campos representativos de sequeiro; (iii) uma adaptação de sistema de orientação GPS com direção automática para o trator e sistema automático

(iv) controle de seção para o pulverizador e plantadeira; (v) fertilização em taxa variável, seja por meio de sistema próprio

controladores ou através do serviço personalizado do revendedor; e (v) um drone multiespectral de nível básico

com software de processamento. Os custos refletem as faixas de mercado de 2022 a 2024 para adaptações e projetos de entrada.

equipamentos e exclui encargos financeiros.

Tabela 3 – Custos ilustrativos dos componentes, benefícios anuais esperados e retorno do investimento.

Este artigo é publicado em acesso aberto sob a licença Creative Commons Attribution, que permite o uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.

Machine Translated by Google
RCMOS - Revista Científica Multidisciplinar: O Conhecimento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | Submissão: 23 de outubro de 2026 | Aceito: 28 de outubro de 2026 | Publicação: 2 de novembro de 2026

fazenda representativa

Componente	Custo aproximado (USD)	Principal fonte de benefícios	Retorno esperado
Amostragem de solo por zona (primeiro ciclo)	1.800 – 2.400	Corrigindo excessos e aplicação insuficiente de P, K e cal	1-2 anos
Sensores de umidade do solo (4–6) com telemetria	1.200 – 2.000	Menos irrigações, menor energia de bombeamento.	1,5 a 2 anos
Adaptação do sistema de orientação GPS com direção automática	4.500 – 7.500	Redução da sobreposição, do consumo de combustível e da fadiga do operador.	2 a 3 anos
Controle automático de seção (pulverizador + plantador)	6.000 – 9.000	Redução da sobreposição de sementes e produtos químicos	2 a 3 anos
Controlador de taxa variável (próprio)	10.000 – 14.000	Nitrogênio e semeadura específicos para cada zona	3-5 anos
Drone de nível básico + software subscrição	3.000 – 5.500	Detecção prévia de problemas com pragas, vegetação e água.	2,5 a 4 anos

3.4 Indicadores econômicos

Três indicadores foram calculados para cada estratégia. O retorno simples (RP) é o primeiro ano em que

O fluxo de caixa líquido acumulado torna-se não negativo. O valor presente líquido é calculado como:

NPV = ÿ (Bt ÿ Ct) / (1 + r)t, t = 0 … T

onde Bt são os benefícios anuais (economia de insumos, combustível, energia e mão de obra, além do valor das mudanças na produtividade),

Ct são os desembolsos de capital e custos recorrentes (assinaturas, amostragem, manutenção e treinamento), r é o

A taxa de desconto e T representam o horizonte de seis anos. A exposição máxima do capital é definida como o valor mais negativo.

do fluxo de caixa líquido acumulado durante o horizonte; aproxima-se do valor máximo que a fazenda deve

financiar ou recorrer às reservas, e é o indicador que mais se alinha com a tolerância ao risco de

Operações familiares.

As economias resultantes da sobreposição foram calculadas como o produto da despesa de insumos afetada e da sobreposição de base.

taxa e percentual de sobreposição eliminados pela orientação e controle de seção (considerando 70%).

A economia na irrigação foi calculada como o número de irrigações evitadas por meio de sistemas baseados em sensores.

multiplicado pelo custo de programação por evento. Os efeitos de rendimento foram incluídos apenas para taxas variáveis.

nitrogênio e para detecção precoce de problemas com imagens, e foram definidos em valores conservadores (1,0–

1,5% da receita bruta dos campos afetados).

Este artigo é publicado em acesso aberto sob a licença Creative Commons Attribution, que permite o uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio.
médio, desde que a obra original seja devidamente citada.

Machine Translated by Google
Revista Interdisciplinar do Conhecimento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | Submissão: 23 de outubro de 2026 | Aceito: 28 de outubro de 2026 | Publicação: 2 de novembro de 2026

3.5 Comparação de estratégias

Estratégia A — Pacote completo no Ano 0. A fazenda adquire todos os componentes de uma só vez: amostragem de solo, sensores, sistema de orientação com direção automática, controle de seção, um controlador de taxa variável próprio e um drone, com um investimento inicial total de aproximadamente USD 48.000. **Estratégia B — Integração faseada.** A fazenda Implementa a Fase 1 (amostragem de solo e sensores de umidade, cerca de USD 3.200) no Ano 0; Fase 2 (Guiamento com direção automática e controle de seção, cerca de USD 14.000) no segundo ano, após os benefícios da Fase 1. foram verificadas; e a Fase 3 (drone e software, cerca de USD 5.500) no Ano 3. Taxa variável A aplicação é adquirida como um serviço personalizado do revendedor de fertilizantes, em vez de ser feita por meio de uma empresa própria. controlador.

3.6 Análise de sensibilidade

Foi realizada uma análise de sensibilidade individual para seis parâmetros: preço do nitrogênio, resposta da produtividade. para prescrições de taxa variável, preço do combustível, a redução da sobreposição alcançada, custo do equipamento e o Número de eventos de irrigação evitados. Os intervalos foram escolhidos para refletir a volatilidade de preços observada em 2020–2024 e a dispersão das respostas agronômicas relatadas na literatura.

4. O QUADRO DE INTEGRAÇÃO POR ETAPAS

A estrutura traduz as complementaridades identificadas na Seção 2 em uma sequência de três. fases, cada uma fechada por um portão de decisão. O princípio de projeto é que **cada fase deve gerar ambos Um retorno financeiro e um ativo de informação que reduz o custo ou o risco da próxima fase.**

4.1 Fase 1 — Diagnóstico (Temporada 1)

A Fase 1 estabelece a base de dados da fazenda a baixo custo. Os limites dos campos são digitalizados e verificados; O solo é amostrado por zona de gestão (definida inicialmente a partir de mapas de levantamento de solos, imagens aéreas e o conhecimento do operador) em vez de por todo o campo; e são instaladas de quatro a seis sondas de umidade do solo. no sistema de pivô irrigado e em campos representativos de sequeiro. O consultor constrói uma camada de zonas simples. que será reutilizado em todas as fases posteriores e treina o operador a ler painéis de sensores usando um regra de decisão — por exemplo, irrigar quando a depleção ponderada de água no solo na zona radicular exceder um limiar específico para cada cultura e estágio de desenvolvimento, com evapotranspiração de referência da rede TexasET. Utilizado como verificação cruzada.

Este artigo é publicado em acesso aberto sob a licença Creative Commons Attribution, que permite o uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.

Machine Translated by Google
Revista Ibero-Americana do Conhecimento Multidisciplinar
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | Submissão: 23 de outubro de 2026 | Aceito: 28 de outubro de 2026 | Publicação: 2 de novembro de 2026

Os benefícios da Fase 1 provêm de duas fontes. A amostragem por zonas normalmente revela que algumas zonas têm

Algumas pessoas estão recebendo fósforo, potássio ou cal em excesso, enquanto outras apresentam deficiência; correção.

Isso redistribui, em vez de aumentar, as despesas. O agendamento da irrigação baseado em sensores evita...

Eventos de irrigação baseados em calendário ou em "sensação", o que reduz diretamente o consumo de energia e água de bombeamento.

retiradas.

Etapa de Decisão 1 — prosseguir para a Fase 2 quando: • A

camada de zona tiver sido verificada em campo e armazenada em um formato utilizável pelos equipamentos de orientação e aplicação.

• Pelo menos uma temporada de dados de sensores mostra eventos de irrigação evitados, documentados em comparação com os registros de bombeamento do ano anterior.

• O operador consegue interpretar os resultados dos testes de solo por zona e já definiu, em conjunto com o consultor, as taxas de manutenção ou de recuperação.

• Um cálculo simples de retorno do investimento para a Fase 2, utilizando os próprios insumos e gastos com combustível da fazenda, mostra que o retorno ocorre em três semanas.

anos.

4.2 Fase 2 — Orientação e controle (Temporadas 2–3)

A Fase 2 introduz o sistema de orientação por GPS com direção automática e controle automático de seção no pulverizador e

plantador. Esses componentes proporcionam os retornos mais confiáveis documentados na literatura e exigem

Interpretação mínima após a instalação. Adaptação de equipamentos existentes com orientações de mercado de reposição.

Os displays e controladores de seção mantêm os custos bem abaixo do preço de novos equipamentos. Nesta fase,

A fertilização com taxa variável é realizada por meio do serviço de aplicação personalizada do revendedor, utilizando a zona.

Resultados da análise de solo e da camada de solo da Fase 1. Este arranjo híbrido proporciona o benefício agronômico de

Nitrogênio e fósforo em taxa variável sem o custo de um controlador próprio.

Etapa de Decisão 2 — prosseguir para a Fase 3 quando: • A

redução da sobreposição for verificada comparando as compras de insumos por hectare com as duas anteriores.
estações.

• Mapas de produtividade (do monitor combinado ou da colhedora terceirizada) foram coletados por pelo menos uma safra e alinhados com a camada de zonas.

• Comparações em faixas de aplicação

de nitrogênio em taxa variável versus taxa uniforme foram realizadas e colhidas na propriedade.

• O fluxo de caixa acumulado das Fases 1 e 2 é positivo ou projeta-se que se torne positivo dentro de um
temporada.

4.3 Fase 3 — Explorar e refinar (Temporada 3 em diante)

A Fase 3 adiciona o reconhecimento por drones assim que os sistemas de dados de referência estiverem estabelecidos. O valor das imagens depende

Este artigo é publicado em acesso aberto sob a licença Creative Commons Attribution, que permite o uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.

Machine Translated by Google

Ano VII, v.2 2026 | Submissão: 23 de outubro de 2026 | Aceito: 28 de outubro de 2026 | Publicação: 2 de novembro de 2026

Sobre a interpretação: um mapa NDVI só é útil quando as anomalias podem ser verificadas em relação à zona.
limites, análises de solo, dados de sensores e histórico de produtividade. Na Fase 3, a fazenda possui essas camadas. As imagens são
então usado para três tarefas: detecção precoce de problemas na cultura após a emergência, inspeção direcionada para
Pragas e doenças, e identificação da não uniformidade da irrigação sob o pivô. O consultor.
Auxilia na interpretação na primeira temporada e gradualmente transfere a rotina para o operador ou
funcionário.

Tabela 4 – Resumo da estrutura trifásica

Fase	Componentes	Ativo de informação criado	retorno típico do primeiro ano
1. Diagnóstico	Amostragem de solo por zona; sensores de umidade; limites do campo	Camada de zona; linha de base da análise de solo; registro de irrigação	Menor energia de bombeamento; P, K e cal corrigidos.
2. Guia e controlar	Adaptação de direção automática; controle de seção; personalizado VRA	Mapas precisos de aplicação e rendimento; data do ensaio em faixas	5–10% menos sementes, produtos químicos e consumo de combustível
3. Escoteiro e refinar	Drone com sensor com capacidade multiespectral; software de processamento	Arquivo de imagens sazonais vinculado a zonas	Detecção precoce de problemas; melhor uniformidade do pivô

5 RESULTADOS

5.1 Fluxo de caixa acumulado

A Figura 2 compara o fluxo de caixa líquido acumulado das duas estratégias. A Estratégia A (pacote completo) começa
com um desembolso de aproximadamente USD 48.000 e recupera seu investimento durante o Ano 4, encerrando o
Horizonte de seis anos com fluxo de caixa líquido acumulado de aproximadamente USD 39.500. Estratégia B (em etapas) nunca
expõe a fazenda a mais de aproximadamente USD 5.200 de fluxo de caixa negativo acumulado, tornando-se positivo.
no terceiro ano, e encerra o horizonte com um fluxo de caixa líquido acumulado de cerca de USD 43.800.

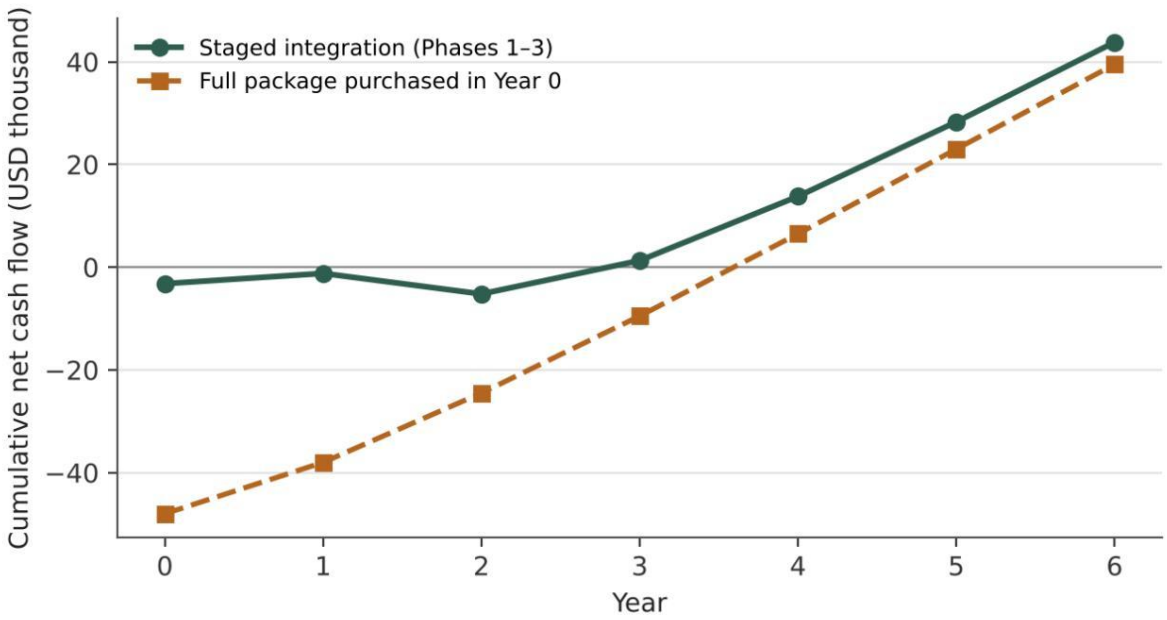
Figura 2 – Fluxo de caixa líquido acumulado (não descontado) da integração faseada versus a compra de uma
Pacote completo de agricultura de precisão no Ano 0 em uma fazenda representativa de 600 acres. Caso base.

Este artigo é publicado em acesso aberto sob a licença Creative Commons Attribution, que permite o uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio.
médio, desde que a obra original seja devidamente citada.

Machine Translated by Google
Revista Interdisciplinar do Conhecimento. Multidisciplinar
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | Submissão: 23 de outubro de 2026 | Aceito: 28 de outubro de 2026 | Publicação: 2 de novembro de 2026

pressupostos conforme descritos nas Tabelas 2 e 3



A estratégia em etapas apresenta um desempenho ligeiramente melhor no final do horizonte por dois motivos. Primeiro, ela evita

o custo de um controlador de taxa variável próprio, cujos benefícios, em uma fazenda de 600 acres, podem ser obtidos em

Reduzir custos através de aplicações personalizadas. Em segundo lugar, adia os desembolsos de capital até que as fases anteriores estejam concluídas.

gerou dinheiro e dados, o que reduz o risco de que equipamentos sejam comprados, mas subutilizados — um

Resultado frequente quando os pacotes são adotados antes que o operador tenha as habilidades ou os dados necessários para usá-los.

5.2 Indicadores econômicos

Tabela 5 – Indicadores econômicos para as duas estratégias (cenário base, horizonte de seis anos, desconto de 7%)

avaliar)

Indicador	Estratégia A: Pacote completo	Estratégia B: Etapas
Investimento inicial de capital (Ano 0)	USD 48.000	USD 3.200
Exposição máxima de capital	USD 48.000	USD 5.200
Ano em que o fluxo de caixa acumulado se torna positivo.	4º ano	3º ano
Fluxo de caixa líquido acumulado, Ano 6	USD 39.500	USD 43.800
Valor presente líquido a 7%	Aproximadamente USD 20.300	Aproximadamente USD 30.700
Redução anual do custo dos insumos em plena capacidade implementação	11–15%	9–13%
Risco de subutilização do equipamento	Alto	Baixo

Este artigo é publicado em acesso aberto sob a licença Creative Commons Attribution, que permite o uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.

Machine Translated by Google
Revista Científica Multidisciplinar: O Conhecimento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

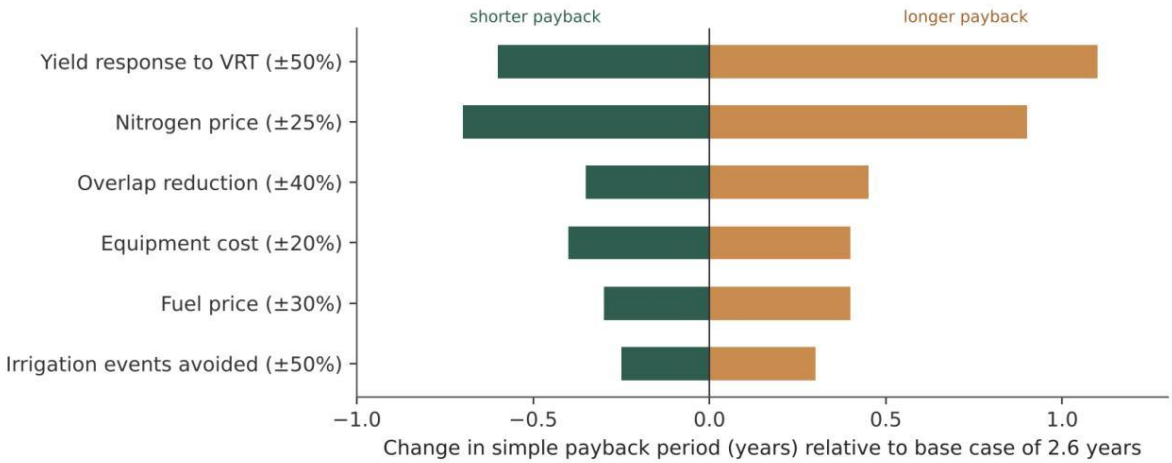
Ano VII, v.2 2026 | Submissão: 23 de outubro de 2026 | Aceito: 28 de outubro de 2026 | Publicação: 2 de novembro de 2026

As reduções nos custos de insumos, após a implementação completa, situam-se na faixa de 8 a 15% das despesas afetadas.
consistente com os intervalos publicados resumidos na Seção 2 e com os resultados observados em
operações comparáveis. A estratégia faseada gera economias ligeiramente menores nos primeiros anos porque
Há menos componentes em uso, mas isso é compensado por uma exposição de capital muito menor.

5.3 Sensibilidade

A Figura 3 apresenta a sensibilidade do retorno simples da estratégia em etapas a seis parâmetros. O retorno é
mais sensível à resposta de rendimento obtida com prescrições de taxa variável e aos preços do nitrogênio.
Preços mais altos do nitrogênio reduzem o retorno do investimento, pois cada quilo de nitrogênio economizado vale mais; um fator negativo.
A resposta da produtividade prolonga o retorno do investimento em aproximadamente um ano. Custo do equipamento, preço do combustível, redução da sobreposição.
e eventos de irrigação evitados têm efeitos menores. Em nenhum dos cenários de parâmetro único examinados isso ocorre.
O retorno do investimento da estratégia faseada ultrapassa quatro anos.

Figura 3 – Sensibilidade do período de retorno simples da estratégia em etapas aos principais parâmetros (um-em-variação temporal em torno de um caso base de 2,6 anos). Os intervalos são mostrados entre parênteses.



5.4 Resultados agronômicos e operacionais

Além dos indicadores financeiros, o modelo e a experiência em campo indicam diversas questões operacionais.
Resultados. A estabilidade da produção melhora quando a irrigação é programada por sensores em vez de por calendário.
devido ao estresse hídrico em estágios críticos (floração no sorgo e no milho, formação de botões florais e formação de cápsulas no algodão)
é reduzida. A orientação e a direção automática prolongam a jornada de trabalho efetiva, o que é importante em espaços estreitos.
Janelas de plantio após a chuva. Finalmente, as camadas de dados construídas durante a Fase 1 e a Fase 2 oferecem suporte.

Este artigo é publicado em acesso aberto sob a licença Creative Commons Attribution, que permite o uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio.
médio, desde que a obra original seja devidamente citada.

Machine Translated by Google
Revista Científica Multidisciplinar: O Conhecimento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | Submissão: 23 de outubro de 2026 | Aceito: 28 de outubro de 2026 | Publicação: 2 de novembro de 2026

Documentação solicitada por credores, seguradoras agrícolas e compradores, reduzindo o trabalho administrativo — um

Benefício frequentemente negligenciado dos sistemas de precisão.

6 DISCUSSÃO

6.1 Interpretação

Os resultados corroboram a tese central deste artigo: para propriedades rurais de médio porte, como a agricultura de precisão pode ser eficaz?

A forma como as tecnologias são adotadas é tão importante quanto as tecnologias escolhidas. Um pacote completo pode ser vantajoso a longo prazo.

um horizonte de seis anos, mas concentra o risco no Ano 0 e depende da aquisição, pelo operador, de um único

A abordagem por etapas inverte essa lógica.

Começa com diagnósticos baratos que geram economia imediata e uma base de dados, acrescenta o

As tecnologias mais confiáveis são introduzidas em seguida, e as ferramentas que exigem muita interpretação são implementadas somente depois que...

As informações necessárias para interpretá-los estão disponíveis.

Essa descoberta é consistente com o argumento de complementaridade de Lowenberg-DeBoer e Erickson.

(2019) e com a observação de que a tecnologia de taxa variável está sendo cada vez mais fornecida por meio de

prestadores de serviços (Erickson & Lowenberg-DeBoer, 2020). Também está em consonância com a literatura sobre extensão.

ênfase na "melhor adequação" em vez da "melhor prática" (Birner et al., 2009): a mesma tecnologia pode ser

lucrativo em uma fazenda e não lucrativo na fazenda vizinha, dependendo da sequência em que é

introduzida e os dados disponíveis para apoiá-la.

6.2 O papel da consultoria

A estrutura pressupõe que alguém desempenhe três funções que geralmente estão ausentes em empresas de médio porte.

Fazendas: diagnóstico agronômico (interpretação de análises de solo, dados de sensores e imagens), modelagem financeira.

(calculando o retorno do investimento com os custos da própria fazenda) e treinamento do operador (configuração do equipamento e

estabelecendo regras de decisão simples). Os revendedores de equipamentos fornecem instalação e treinamento, mas têm um

incentivo para vender pacotes completos; especialistas em extensão rural fornecem orientação baseada em pesquisa, mas têm

Tempo limitado para propriedades rurais individuais; e os agrônomos de varejo fornecem prescrições, mas estão vinculados aos insumos.

vendas. Um consultor independente que combine essas funções pode sequenciar a adoção na fazenda.
interesse e documentar os resultados.

A Walter's Agribusiness Consulting, LLC aplica esse modelo no Condado de Bexar e nos condados vizinhos.

A abordagem baseia-se na experiência em gestão de operações comerciais no Cerrado brasileiro, onde

Grandes áreas são gerenciadas com equipes reduzidas e protocolos de campo rigorosos, e adaptam-se a essas práticas.

Este artigo é publicado em acesso aberto sob a licença Creative Commons Attribution, que permite o uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio.
médio, desde que a obra original seja devidamente citada.

Machine Translated by Google
Revista Científica Multidisciplinar: O Conhecimento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | Submissão: 23 de outubro de 2026 | Aceito: 28 de outubro de 2026 | Publicação: 2 de novembro de 2026

métodos organizacionais para os solos, culturas, restrições hídricas e redes de serviços do Centro-Sul
Texas.

Lista de verificação prática para consultores que aplicam a estrutura • Reúna
registros de entrada, combustível e bombeamento de dois a três anos antes de recomendar qualquer equipamento.

• Crie a camada de zonas uma única vez e certifique-se de que todos os dispositivos posteriores consigam
lê-la. • Utilize serviços personalizados (VRA, imagens, mapeamento de colheita) antes de adquirir equipamentos com a mesma função.

• Exija uma estimativa de retorno do investimento por escrito, utilizando os números da própria fazenda, em cada etapa de
decisão. • Estabeleça comparações entre faixas de cultivo na própria fazenda para que os resultados sejam demonstrados nos
campos do produtor. • Limite o operador a uma nova regra de decisão por
safra. • Documente os resultados em um resumo sazonal de uma página que também possa ser usado com financiadores e compradores.

6.3 Implicações mais amplas

As fazendas de médio porte administram uma grande parcela das terras agrícolas no Texas. Maior adoção de tecnologias de precisão.
Entre essas fazendas, contribui-se para os objetivos nacionais de eficiência no uso de recursos: menor nitrogênio.
perdas para a água e o ar, menos pesticidas aplicados fora das áreas-alvo, consumo reduzido de combustível e muito mais.
Uso eficiente de águas subterrâneas em regiões onde os aquíferos estão sob pressão. Porque o escalonamento
Ao reduzir o limite de capital, o quadro regulatório amplia o número de propriedades rurais para as quais a adoção é permitida.
financeiramente racional e, portanto, com benefícios ambientais e de produtividade agregados. Também
Apoia a resiliência econômica rural ao melhorar a rentabilidade das operações familiares que servem de base para o setor.
economias locais

6.4 Limitações

A análise apresenta diversas limitações. A fazenda representativa é uma construção estilizada; as fazendas atuais
diferem na variedade de culturas, na idade dos equipamentos, no acesso à irrigação e na variabilidade do solo, fatores que afetam os retornos.
O modelo é determinístico e utiliza análise de sensibilidade de um elemento por vez; ele não captura correlações.
entre preços e rendimentos ou a distribuição completa dos resultados climáticos. Os números da taxa de adoção são
Compilado a partir de diversas fontes com definições diferentes e deve ser interpretado como indicativo.
Por fim, os benefícios da melhoria da documentação e da qualidade das decisões são difíceis de quantificar e são
apenas parcialmente incluído. Trabalhos futuros devem validar a estrutura com dados de múltiplas temporadas de um
painel de fazendas de médio porte na região e estende o modelo para simulação estocástica.

Este artigo é publicado em acesso aberto sob a licença Creative Commons Attribution, que permite o uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio.
médio, desde que a obra original seja devidamente citada.

Machine Translated by Google
© Conhecimento. Multidisciplinar
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | Submissão: 23 de outubro de 2026 | Aceito: 28 de outubro de 2026 | Publicação: 2 de novembro de 2026

7 CONCLUSÃO

A agricultura de precisão já não está limitada pela disponibilidade de tecnologia; para explorações agrícolas de média dimensão, está limitada.

por exposição de capital, tempo do operador e ausência de retornos demonstrados localmente. Uma abordagem em etapas.

Estrutura de integração — primeiro o diagnóstico, depois a orientação e o controle, e por fim a prospecção e o aprimoramento, com explicitação.

portões de decisão — aborda todos os três. Em uma fazenda representativa de 600 acres no centro-sul do Texas,

O parcelamento reduz a exposição máxima do capital em cerca de 90% em comparação com a compra do pacote completo.

atinge um fluxo de caixa acumulado positivo um ano antes e oferece um valor presente líquido mais elevado (cerca de

(USD 30.700 versus USD 20.300). Reduções de custos de insumos de 8 a 15% e melhoria na estabilidade da produção.

são alcançáveis quando as recomendações são adaptadas às condições locais e apoiadas por consultas.

que integra diagnóstico, análise financeira e treinamento. A abordagem gera retornos privados para

produtores, ao mesmo tempo que contribuem para objetivos mais amplos de eficiência e conservação.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece aos produtores e prestadores de serviços no centro-sul do Texas e em Goiás, Brasil.

cuja experiência operacional fundamentou as premissas deste artigo.

DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSES

O autor é o fundador da Walter's Agribusiness Consulting, LLC, que presta serviços de consultoria.

Serviços relacionados ao tema deste artigo. Nenhum financiamento externo foi recebido.

REFERÊNCIAS

Anderson, JR, & Feder, G. (2007). Extensão agrícola. Em R. Evenson & P. Pingali (Eds.), Manual de economia agrícola (Vol. 3, pp. 2343–2378). Elsevier.

Birner, R., Davis, K., Pender, J., Nkonya, E., Anandajayasekeram, P., Ekboir, J., et al. (2009). Da melhor prática à melhor adequação: uma estrutura para projetar e analisar serviços de extensão agrícola pluralistas em todo o mundo. Journal of Agricultural Education and Extension, 15(4), 341–355.

Erickson, B., & Lowenberg-DeBoer, J. (2020). Pesquisa de concessionárias de agricultura de precisão de 2020. Universidade Purdue e CropLife.

Griffin, TW, Shockley, JM e Mark, TB (2018). Economia da agricultura de precisão. Em DK Shannon, DE Clay & NR Kitchen (Eds.), Noções básicas de agricultura de precisão. ASA, CSSA e SSSA.

Lowenberg-DeBoer, J., & Erickson, B. (2019). Esclarecendo os fatos sobre a agricultura de precisão.

Este artigo é publicado em acesso aberto sob a licença Creative Commons Attribution, que permite o uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.

Machine Translated by Google

Ano VII, v.2 2026 | Submissão: 23 de outubro de 2026 | Aceito: 28 de outubro de 2026 | Publicação: 2 de novembro de 2026

adoção. Agronomy Journal, 111(4), 1552–1569.

McFadden, J., Njuki, E., & Griffin, T. (2023). Agricultura de precisão na era digital: adoção recente em fazendas dos EUA (EIB-248). Serviço de Pesquisa Econômica do USDA.

Schimmelpfennig, D. (2016). Lucros agrícolas e adoção da agricultura de precisão (ERR-217). Serviço de Pesquisa Econômica do USDA.

Extensão Agrícola da Texas A&M. (2023). Rede TexasET e recursos de programação de irrigação. Sistema da Universidade Texas A&M.

Serviço de Pesquisa Econômica do USDA. (2023). Tecnologias de agricultura de precisão e rentabilidade agrícola. Departamento de Agricultura dos EUA.

Serviço de Conservação de Recursos Naturais do USDA. (2022). Programa de Incentivos à Qualidade Ambiental: Padrões de práticas de agricultura de precisão e gestão de nutrientes. Departamento de Agricultura dos EUA.

Este artigo é publicado em acesso aberto sob a licença Creative Commons Attribution, que permite o uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.