Machine Translated by Google
RCMOS – Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 2, 2026 | Envío: 23 de octubre de 2026 | Aceptación: 28 de octubre de 2026 | Publicación: 2 de noviembre de 2026

Integración gradual de tecnologías de agricultura de precisión en explotaciones agrícolas medianas en Texas: Un modelo tecnoeconómico para lograr mejoras en la eficiencia.

Integración gradual de tecnologías de agricultura de precisión en explotaciones agrícolas medianas de Texas: un marco tecnoeconómico para el aumento de la eficiencia.

Integración escalonada de tecnologías de agricultura de precisión en explotaciones agrícolas de tamaño mediano. Texas: un marco tecnoeconómico para lograr mejoras en la eficiencia

Walter Luiz Ribeiro Adriano

Licenciatura en Ciencias Agrícolas (Agronomía), Universidad Federal de Goiás – UFG, 2009
Fundador y Consultor Principal de Walter's Agribusiness Consulting, LLC (WA Consulting)
Condado de Bexar, Texas, Estados Unidos
Correo electrónico: walterluizadriano@gmail.com

ABSTRACTO

Antecedentes. Las tecnologías de agricultura de precisión (AP) —guía GPS, control de secciones, detección de humedad del suelo, aplicación de tasa variable (VRA) y exploración aérea no tripulada— están técnicamente maduras, pero su adopción sigue siendo desigual entre las clases de tamaño de las explotaciones agrícolas de EE. UU. Las explotaciones comerciales de tamaño medio de aproximadamente 200 a 1500 acres, que son comunes en el centro-sur de Texas, a menudo carecen de personal técnico especializado y se enfrentan a limitaciones de capital y aprendizaje que ralentizan la adopción. Objetivo.
Este artículo desarrolla y evalúa un marco de integración por etapas diseñado para reducir los umbrales de capital y conocimiento que enfrentan estas fincas, al tiempo que produce ganancias medibles en eficiencia de insumos y estabilidad de rendimiento en dos o tres temporadas. Métodos. El análisis combina una revisión estructurada de la evidencia publicada sobre adopción y rentabilidad (Servicio de Investigación Económica del USDA y literatura revisada por pares) con un modelo tecnoeconómico de una finca representativa de 600 acres de cultivos mixtos en la región del condado de Bexar. Se comparan las estrategias de adopción por etapas y de adopción simultánea en términos de flujo de caja acumulado, período de recuperación simple, valor actual neto (VAN) y sensibilidad a precios clave y respuestas agronómicas.
Resultados. Bajo los supuestos del caso base, la integración por etapas mantiene la exposición máxima al capital por debajo de los 6000 USD, alcanza un flujo de caja acumulado positivo en el año 3 y genera un VAN más alto que la compra de un paquete completo por adelantado (aproximadamente 30 700 USD frente a 20 300 USD), con un riesgo a la baja mucho menor. Las reducciones esperadas en los costos de los insumos, de entre el 8 % y el 15 %, son consistentes con los rangos publicados.
La rentabilidad depende principalmente de los precios del nitrógeno y de la respuesta de rendimiento obtenida con prescripciones de tasa variable. Conclusiones. La secuenciación de herramientas de diagnóstico, seguida de la guía y el control de secciones, y finalmente el monitoreo basado en imágenes, con el apoyo de consultoría que integra diagnóstico agronómico, modelado financiero y capacitación de operadores, hace que la agricultura de precisión sea accesible y rentable para las explotaciones agrícolas medianas de Texas y contribuye a objetivos nacionales más amplios de eficiencia en el uso de recursos.
Palabras clave: agricultura de precisión; sensores de humedad del suelo; guiado GPS; tecnología de tasa variable; sistemas aéreos no tripulados; explotaciones agrícolas medianas; análisis tecnoeconómico; Texas; consultoría agroindustrial

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión se refiere a una familia de prácticas de gestión intensivas en información que utilizan datos de ubicación, sensores y reglas de decisión para hacer coincidir las entradas con la variabilidad espacial y temporal encontrada dentro de los campos. Desde la comercialización de los monitores de rendimiento y el GPS diferencial en la década de 1990, el El conjunto de tecnologías se ha ampliado para incluir dirección automática cinemática en tiempo real (RTK), sección automática control de pulverizadores y sembradoras, siembra y fertilización de tasa variable, humedad del suelo en el campo telemetría y, más recientemente, imágenes multiespectrales recopiladas por pequeños sistemas aéreos no tripulados.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 2, 2026 | Envío: 23 de octubre de 2026 | Aceptación: 28 de octubre de 2026 | Publicación: 2 de noviembre de 2026

(drones). Cada componente está disponible comercialmente, tiene un precio competitivo y cuenta con el respaldo del distribuidor.
redes en todo Texas. Sin embargo, la evidencia nacional muestra que la adopción está fuertemente estratificada por granja.
tamaño: las grandes explotaciones adoptan antes y de forma más completa, mientras que las explotaciones medianas adoptan de forma selectiva y
a menudo se detienen después del primer componente (Schimmelpfennig, 2016; McFadden, Njuki y Griffin, 2023).
La persistencia de esta brecha es importante por dos razones. En primer lugar, las operaciones de tamaño mediano gestionan una cantidad sustancial de...
porcentaje de tierras cultivables en Texas y en los Estados Unidos en su conjunto. Si se quedan atrás en la adopción de medidas de ahorro de insumos
tecnología, las ganancias agregadas en eficiencia de fertilizantes, combustible, agua y pesticidas que precisión
La agricultura puede ofrecer será correspondientemente más pequeña. En segundo lugar, las granjas de tamaño mediano son precisamente las
operaciones para las que la eficiencia de costos es más importante: son lo suficientemente grandes como para depender de
márgenes comerciales y demasiado pequeños para absorber repetidos años de bajos rendimientos. Una tecnología que reduce
Incluso una variación del diez por ciento en los costes de los insumos puede representar la diferencia entre la reinversión y la contracción.
El sur de Texas ilustra bien el desafío. Las granjas en el condado de Bexar y sus alrededores operan bajo
un clima semiárido a subhúmedo, con alta demanda de evaporación, precipitaciones erráticas y suelos que varían
desde suelos franco-arcillosos profundos hasta perfiles calcáreos poco profundos en distancias cortas. Las mezclas de cultivos son comunes.
Combinan sorgo, maíz, algodón, trigo y forraje, frecuentemente integrados con ganado. riego,
donde esté disponible, depende de los recursos de agua subterránea sujetos a gestión regional — Edwards
La Autoridad del Acuífero regula las extracciones del Acuífero Edwards y los costos de energía para
bombeo. Esta combinación de variabilidad dentro del campo, escasez de agua y empresas diversas es
precisamente el contexto en el que deberían pagarse las tecnologías de precisión. También es un contexto en el que los genéricos
Las recomendaciones fallan porque el valor de cualquier componente depende de los suelos locales, la rotación de cultivos y
equipo que ya se encuentra en la granja.
Este artículo aborda una cuestión práctica: ¿cómo puede una granja mediana de Texas secuenciar la adopción?
de componentes de agricultura de precisión para que cada paso se pague por sí mismo, genere datos y habilidades.
necesario para el siguiente, y mantiene el riesgo financiero dentro de la tolerancia de una empresa comercial de propiedad familiar.
¿Operaciones? La contribución es triple. Primero, el artículo sintetiza la adopción y la rentabilidad.
evidencia relevante para las explotaciones agrícolas de tamaño mediano. En segundo lugar, propone un marco de integración por etapas en tres fases.
con puertas de decisión explícitas. En tercer lugar, evalúa el marco con un enfoque tecnoeconómico transparente.
modelo de una granja representativa de 600 acres, incluyendo análisis de sensibilidad, para que los consultores y
Los productores pueden adaptar los cálculos a sus propias condiciones.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS – Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

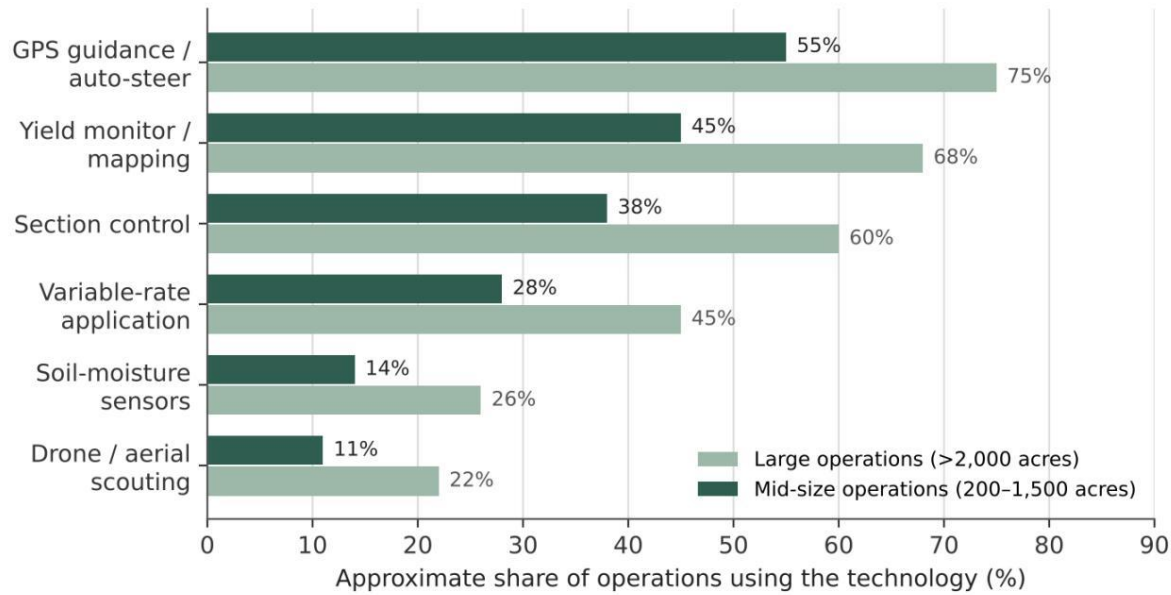
Año VII, vol. 2, 2026 | Envío: 23 de octubre de 2026 | Aceptación: 28 de octubre de 2026 | Publicación: 2 de noviembre de 2026

2 ANTECEDENTES Y BIBLIOGRAFÍA

2.1 Patrones de adopción por tecnología

La Encuesta de Gestión de Recursos Agrícolas (ARMS) del USDA proporciona la información más consistente.
datos nacionales sobre el uso de tecnología de precisión. Los sucesivos análisis del ERS muestran que la guía y la automatización
Los sistemas de novillos se han difundido más rápidamente, llegando a la mayoría de las hectáreas sembradas para los principales cultivos de campo, porque
Sus ventajas —menor solapamiento de tareas, menor fatiga del operario, jornadas laborales más largas y ahorro de combustible—
son inmediatas, visibles y en gran medida independientes de la interpretación agronómica (Schimmelpfennig, 2016;
McFadden et al., 2023). Posteriormente se realizó un seguimiento y mapeo del rendimiento, aunque muchas granjas recopilan datos sobre el rendimiento.
datos sin utilizarlos para cambiar la gestión. La tecnología de tasa variable (VRT) se ha difundido más
lentamente y se entrega con frecuencia a través de aplicadores personalizados y servicios agronómicos minoristas.
que el equipo propio (Erickson y Lowenberg-DeBoer, 2020). Sensores de humedad del suelo en el campo y
El reconocimiento basado en drones sigue siendo uno de los componentes menos adoptados, concentrado en cultivos especializados y de regadío.
sistemas y operaciones de gran envergadura.

Figura 1 – Tasas de adopción aproximadas de tecnologías de agricultura de precisión seleccionadas por
Clase de tamaño de operación en los Estados Unidos. Compilación del autor y redondeo de USDA ERS
Análisis y encuestas del sector, 2016-2023; los valores son indicativos y tienen fines comparativos.
en todas las tecnologías en lugar de como estimaciones precisas



La Figura 1 resume el patrón general. Dos características son importantes para el marco desarrollado.
Aquí. Primero, la clasificación de las tecnologías es similar para las granjas medianas y grandes; lo que difiere es el nivel.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio.
medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
Producción científica multidisciplinaria: Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 2, 2026 | Envío: 23 de octubre de 2026 | Aceptación: 28 de octubre de 2026 | Publicación: 2 de noviembre de 2026

de adopción. Esto implica que las barreras que enfrentan las granjas medianas no tienen que ver principalmente con la tecnología.
idoneidad, pero sobre las condiciones en las que se produce la adopción. En segundo lugar, la brecha entre las clases de tamaño.
es proporcionalmente mayor para las tecnologías que requieren interpretación de datos: VRT, sensores y
drones, y otros más pequeños para guiado, que funcionan "de inmediato".

2.2 Evidencia de rentabilidad

Los estudios sobre la economía de la agricultura de precisión a nivel de explotación agrícola reportan resultados positivos pero heterogéneos.
Griffin, Shockley y Mark (2018) resumen la literatura económica y concluyen que la orientación
y el control de secciones muestran los beneficios netos más consistentes, generalmente a través de reducciones de 5 a 15
porcentaje de superposición de semillas, fertilizantes y productos fitosanitarios, y a través del ahorro de combustible y mano de obra.
Los rendimientos de la fertilización de tasa variable son más variables: son más fuertes donde la variabilidad dentro del campo
El potencial de rendimiento es grande y estable a lo largo del tiempo y donde el agricultor tiene los datos de suelo y rendimiento necesarios.
para construir zonas de gestión defendibles. Schimmelpfennig (2016) descubrió que la adopción de precisión
Las tecnologías se asociaron con aumentos modestos en el beneficio operativo, con mayores efectos en las tecnologías más grandes.
explotaciones agrícolas, un resultado atribuible en parte a la capacidad de distribuir los costes fijos entre más hectáreas.
Lowenberg-DeBoer y Erickson (2019) destacan que el argumento económico a favor de la agricultura de precisión
A menudo se subestima en los estudios que analizan una tecnología de forma aislada. Muchos beneficios son
Complementario: La guía GPS crea la precisión posicional necesaria para el control de secciones y VRA;
El muestreo de suelos y los mapas de rendimiento crean la base de información para las prescripciones; y las imágenes son la mayoría
valioso cuando se puede interpretar en función de los mapas de zonas existentes. Esta complementariedad es fundamental para
la lógica de puesta en escena propuesta en la Sección 4.

2.3 ¿Por qué las explotaciones agrícolas medianas se quedan atrás?

La literatura y la experiencia de campo señalan tres categorías superpuestas de barreras: capital y escala .
Las barreras surgen porque muchos componentes de precisión tienen un costo fijo que se distribuye en menos acres.
en una granja de tamaño mediano. Las barreras de conocimiento y tiempo surgen porque el operador a menudo está simultáneamente
el gerente, el operador del equipo y el comercializador; hay poco tiempo para aprender software nuevo,
calibrar sensores o interpretar mapas. Las barreras de evidencia surgen porque los productores razonablemente descuentan
afirmaciones del vendedor y busquen rendimientos demostrados en granjas similares a las suyas, en suelos locales y
clima. Cabe destacar que ninguna de estas barreras tiene que ver con la existencia de tecnología adecuada. Se refieren a
secuenciación, interpretación y demostración: funciones que desempeñan los consultores agrícolas y los extensionistas.
Los servicios están bien posicionados para proporcionar (Anderson y Feder, 2007).

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS – Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 2, 2026 | Envío: 23 de octubre de 2026 | Aceptación: 28 de octubre de 2026 | Publicación: 2 de noviembre de 2026

Tabla 1 – Principales barreras para la adopción en explotaciones agrícolas medianas y la respuesta de diseño correspondiente en el marco por etapas

Categoría de barrera	Cómo se manifiesta en tamaños medianos Granjas de Texas	Respuesta de diseño en el marco
Capital y escala	Altos costos fijos por acre; reticencia a financiar equipos con incertidumbre. devoluciones	Comience con diagnósticos de bajo costo; utilice servicios personalizados para VRA; modernización en lugar de reemplazar
Conocimiento y tiempo	No hay personal técnico dedicado; la responsabilidad del software y la calibración recae en el operador	Configuración dirigida por consultores, breve capacitación del operador, una regla de decisión por herramienta.
Evidencia y confianza	Escepticismo ante las afirmaciones de los vendedores; necesidad de pruebas locales y específicas de la granja.	Cálculo sencillo del período de recuperación de la inversión por fase; comparaciones en parcelas agrícolas; resultados documentados.
Integración de datos	Los datos de diferentes dispositivos no están vinculados; Mapas de rendimiento recopilados pero no utilizados	Capa de límite de campo y zona única establecido en la Fase 1 y reutilizado en fases posteriores

3 MÉTODOS

3.1 Diseño de la investigación

El estudio utiliza un enfoque mixto común en la economía agrícola aplicada: una síntesis estructurada de evidencia secundaria combinada con un modelo tecnoeconómico determinista de un representante granja. El método de granja representativa es ampliamente utilizado por Texas A&M AgriLife y las universidades concesionarias de tierras. instituciones para evaluar opciones de políticas y tecnología, porque permite supuestos transparentes que Los productores individuales pueden reemplazar con sus propios datos. Los parámetros del modelo se obtuvieron de fuentes publicadas. Fuentes disponibles y la experiencia de campo del autor en la gestión y el asesoramiento comercial operan en Brasil y Texas, y son deliberadamente conservadores.

3.2 Granja representativa

La granja representativa es una explotación de cultivos mixtos de 600 acres en la región del condado de Bexar. En ella se cultivan aproximadamente 250 acres de sorgo de grano, 150 acres de maíz, 120 acres de trigo de invierno y 80 acres de algodón en un año típico, con 160 acres abastecidos por un sistema de pivote central alimentado por agua subterránea. El operador posee un tractor de 150 caballos de fuerza, una sembradora de 12 hileras, un pulverizador autopropulsado de 60 pies y un cosecha, todos entre ocho y quince años. El fertilizante es esparcido por un minorista local que ofrece

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 2, 2026 | Envío: 23 de octubre de 2026 | Aceptación: 28 de octubre de 2026 | Publicación: 2 de noviembre de 2026

Aplicación de tasa variable como servicio personalizado. La granja emplea al propietario-operador, un empleado a tiempo completo.

Empleados y trabajadores temporales durante la cosecha.

Tabla 2 – Parámetros del caso base de la granja representativa de 600 acres

Parámetro	Valor base	Fuente / nota
Superficie total cultivada	600 acres	Definición de granja representativa
Área de regadío (pivote central)	160 acres	Típico de regiones con acceso a aguas subterráneas
Gasto anual de nitrógeno	42.000 dólares	ÿ Promedio de USD 70/acre en todos los cultivos
Gastos anuales en semillas, herbicidas e insecticidas	78.000 dólares estadounidenses	Aproximadamente 130 USD por acre en promedio
Combustible anual para operaciones de campo	14.500 dólares estadounidenses	Diésel para labranza, siembra, fumigación y cosecha.
Energía de bombeo anual (zona de regadío)	16.000 dólares	Bombeo eléctrico, USD 100/acre de regadío
Superposición de la sembradora y el pulverizador sin control	7%	Rango medio de las estimaciones publicadas para campos irregulares.
Tasa de descuento	7%	Costo aproximado del capital agrícola
Horizonte de análisis	6 años	Vida útil típica de los componentes electrónicos antes de la actualización.

3.3 Componentes tecnológicos y costes

El modelo considera cinco componentes: (i) muestreo de suelo en cuadrícula o zona con análisis de laboratorio; (ii)

de cuatro a seis sondas de humedad del suelo de tipo capacitivo con telemetría para el área irrigada y

campos representativos de secano; (iii) una modernización de guiado GPS con dirección automática para el tractor y automático

control de sección para el pulverizador y la sembradora; (iv) fertilización de tasa variable, ya sea a través de su propiedad

controladores o a través del servicio de atención al cliente del minorista; y (v) un dron multiespectral de nivel básico

con software de procesamiento. Los costos reflejan los rangos de mercado de 2022 a 2024 para modernizaciones y nivel de entrada.

equipamiento y excluye los gastos de financiación.

Tabla 3 – Costos de componentes ilustrativos, beneficios anuales esperados y período de recuperación de la inversión.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS – Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 2, 2026 | Envío: 23 de octubre de 2026 | Aceptación: 28 de octubre de 2026 | Publicación: 2 de noviembre de 2026

granja representativa

Componente	Costo aproximado (USD)	Fuente principal de beneficios	Retorno esperado
Muestreo de suelo por zonas (primer ciclo)	1.800 – 2.400	Corregir sobre y aplicación insuficiente de P, K y cal	1-2 años
Sensores de humedad del suelo (4–6) con telemetría	1.200 – 2.000	Menos eventos de riego, menor consumo de energía de bombeo.	1,5 – 2 años
Adaptación del sistema de guiado GPS con dirección automática.	4.500 – 7.500	Menor superposición de tareas, menor consumo de combustible y menor fatiga del operador.	2-3 años
Control automático de secciones (pulverizador + maceta)	6.000 – 9.000	Menor superposición de semillas y productos químicos	2-3 años
Controlador de tasa variable (propiedad del titular)	10.000 – 14.000	Nitrógeno y siembra específicos para cada zona	3-5 años
Dron básico + software suscripción	3.000 – 5.500	Detección previa de plagas, problemas de suelo y agua.	2,5 – 4 años

3.4 Indicadores económicos

Se calcularon tres indicadores para cada estrategia. El período de recuperación simple (PB) es el primer año en el que

El flujo de caja neto acumulado se vuelve no negativo. El valor actual neto se calcula de la siguiente manera:

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

donde Bt son los beneficios anuales (ahorros en insumos, combustible, energía y mano de obra más el valor de los cambios en el rendimiento),

Ct son los desembolsos de capital y los costos recurrentes (suscripciones, muestreo, mantenimiento y capacitación), r es el

tasa de descuento y T es el horizonte de seis años. La exposición máxima al capital se define como el valor más negativo.

del flujo de caja acumulado neto durante el horizonte; se aproxima a la cantidad máxima que la explotación agrícola debe

financiar o recurrir a las reservas, y es el indicador que más se alinea con la tolerancia al riesgo de

Negocios familiares.

Los ahorros por superposición se calcularon como el producto del gasto de insumos afectado y la superposición de referencia.

tasa y la proporción de superposición eliminada por la guía y el control de la sección (se supone un 70 por ciento).

El ahorro en riego se calculó como el número de eventos de riego evitados mediante sensores.

multiplicado por la programación de costos por evento. Los efectos de rendimiento se incluyeron solo para la tasa variable.

nitrógeno y para la detección temprana de problemas con imágenes, y se establecieron en valores conservadores (1,0–

1,5 por ciento de los ingresos brutos de los campos afectados).

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio.
medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 2, 2026 | Envío: 23 de octubre de 2026 | Aceptación: 28 de octubre de 2026 | Publicación: 2 de noviembre de 2026

3.5 Estrategias comparadas

Estrategia A: paquete completo en el año 0. La granja compra todos los componentes a la vez: muestreo de suelo, sensores, guiado con dirección automática, control de sección, un controlador de tasa variable propio y un dron, con un desembolso inicial total de aproximadamente 48.000 USD. Estrategia B: Integración por etapas. La granja Implementa la Fase 1 (muestreo de suelo y sensores de humedad, aproximadamente 3200 USD) en el Año 0; Fase 2 (guiado con dirección automática y control de secciones, aproximadamente 14.000 USD) en el Año 2, después de los beneficios de la Fase 1. Se han verificado; y la Fase 3 (dron y software, aproximadamente 5500 USD) en el Año 3. Tasa variable La aplicación se compra como un servicio personalizado al minorista de fertilizantes en lugar de a través de un proveedor propio. controlador.

3.6 Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad individual sobre seis parámetros: precio del nitrógeno, respuesta del rendimiento a las prescripciones de tasa variable, el precio del combustible, la reducción de superposición lograda, el costo del equipo y el número de eventos de riego evitados. Los rangos se eligieron para reflejar la volatilidad de precios observada en 2020–2024 y la dispersión de las respuestas agronómicas reportadas en la literatura.

4. EL MARCO DE INTEGRACIÓN POR ETAPAS

El marco traduce las complementariedades identificadas en la Sección 2 en una secuencia de tres fases, cada una cerrada por una puerta de decisión. El principio de diseño es que cada fase debe generar ambas un retorno financiero y un activo informativo que reduce el coste o el riesgo de la siguiente fase.

4.1 Fase 1 — Diagnóstico (Temporada 1)

La fase 1 establece la base de datos de la explotación agrícola a bajo coste. Los límites de los campos se digitalizan y verifican; El suelo se muestrea por zona de gestión (definida inicialmente a partir de mapas de estudios de suelos, imágenes aéreas y el conocimiento del operador) en lugar de por todo el campo; y se instalan de cuatro a seis sondas de humedad del suelo. en el pivote de riego y en campos representativos de secano. El consultor construye una capa de zona simple que se reutilizará en todas las fases posteriores y capacita al operador para leer los paneles de sensores utilizando uno regla de decisión: por ejemplo, regar cuando el agotamiento ponderado del agua del suelo en la zona radicular exceda un umbral específico para cada cultivo y etapa, con evapotranspiración de referencia de la red TexasET. Se utiliza como verificación cruzada.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google

Año VII, vol. 2, 2026 | Envío: 23 de octubre de 2026 | Aceptación: 28 de octubre de 2026 | Publicación: 2 de noviembre de 2026

Los beneficios en la Fase 1 provienen de dos fuentes. El muestreo de zonas normalmente revela que algunas zonas tienen
Algunos han estado recibiendo fósforo, potasio o cal que no necesitan, mientras que otros tienen deficiencia; corrección
Esto redistribuye en lugar de aumentar el gasto. La programación del riego basada en sensores evita
eventos de riego basados en el calendario o en la "sensación", lo que reduce directamente la energía y el agua de bombeo.
retiros.

Puerta de decisión 1: proceda a la Fase 2 cuando: • La capa de
zona se haya verificado en el campo y se haya almacenado en un formato utilizable por los equipos de guía y aplicación.

• Al menos una temporada de datos de sensores muestra eventos de riego evitados, documentados comparándolos con los registros de bombeo del año anterior.

• El operador puede interpretar los resultados de los análisis de suelo por zona y ha acordado con el consultor las tasas de mantenimiento o de acumulación.

• Un cálculo sencillo del período de recuperación de la inversión para la Fase 2, utilizando los propios insumos y gastos de combustible de la granja, muestra un período de recuperación de tres meses.
años.

4.2 Fase 2 — Guía y control (Temporadas 2-3)

La fase 2 introduce la guía GPS con dirección automática y control automático de secciones en el pulverizador y
maceta. Estos componentes ofrecen los rendimientos más fiables documentados en la literatura y requieren
Mínima interpretación una vez instalado. Modernización de equipos existentes con orientación del mercado de repuestos.
Las pantallas y los controladores de sección mantienen los costos muy por debajo del precio de los equipos nuevos. En esta fase,
La fertilización de tasa variable se realiza a través del servicio de aplicación personalizada del minorista, utilizando la zona.
resultados de análisis de suelo y de capas de la Fase 1. Este arreglo híbrido proporciona el beneficio agronómico de
Dosificación de nitrógeno y fósforo a tasa variable sin el coste de un controlador propio.

Puerta de decisión 2: proceda a la Fase 3 cuando: • Se haya
verificado la reducción de superposición comparando las compras de insumos por acre con las dos anteriores.
estaciones.

• Se han recopilado mapas de rendimiento (del monitor combinado o de la cosechadora) durante al menos una temporada y se han alineado con la capa de
zonas. • Se han establecido y
cosechado parcelas comparativas en la finca para la aplicación de nitrógeno a tasa variable frente a la aplicación uniforme.

• El flujo de caja acumulado de las Fases 1 y 2 es positivo o se prevé que se vuelva positivo en un plazo de un año.
estación.

4.3 Fase 3: Exploración y perfeccionamiento (a partir de la temporada 3)

La fase 3 añade exploración basada en drones una vez que existan sistemas de datos de referencia. El valor de las imágenes depende

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 2, 2026 | Envío: 23 de octubre de 2026 | Aceptación: 28 de octubre de 2026 | Publicación: 2 de noviembre de 2026

sobre interpretación: un mapa NDVI es útil solo cuando las anomalías se pueden verificar con respecto a la zona.
límites, análisis de suelo, datos de sensores e historial de rendimiento. Para la Fase 3, la granja cuenta con estas capas. Las imágenes son
luego se utiliza para tres tareas: detección temprana de problemas en el rodal después de la emergencia, exploración dirigida para
plagas y enfermedades, e identificación de la falta de uniformidad del riego bajo el pivote. El consultor
apoya la interpretación en la primera temporada y gradualmente transfiere la rutina al operador o
empleado.

Tabla 4 – Resumen del marco de tres fases

Fase	Componentes	Activo de información creado	Rentabilidad típica del primer año
1. Diagnóstico	Muestreo de suelo por zonas; suelo-sensores de humedad; límites de campo	Capa de zona; línea base de análisis de suelo; registro de riego	Menor energía de bombeo; P, K y cal corregidos
2. Guía y control	Adaptación del sistema de dirección automática; control de sección; personalizado VRA	Mapas precisos de aplicación y rendimiento; fecha de prueba de franjas	5–10% menos semillas, productos químicos y consumo de combustible
3. Explorador y refinar	Dron con sensor con capacidad multiespectral; software de procesamiento	Archivo de imágenes estacionales vinculado a zonas	Detección temprana de problemas; mejor uniformidad del pivote

5 RESULTADOS

5.1 Flujo de caja acumulado

La Figura 2 compara el flujo de caja neto acumulado de las dos estrategias. La estrategia A (paquete completo) comienza
con un desembolso de aproximadamente USD 48.000 y recupera su inversión durante el año 4, finalizando el
Horizonte de seis años con un flujo de caja neto acumulado de aproximadamente USD 39.500. Estrategia B (por etapas) nunca
expone la granja a más de aproximadamente USD 5200 de flujo de caja negativo acumulado, se vuelve positiva
En el año 3, y finaliza el horizonte con un flujo de caja neto acumulado de aproximadamente 43.800 USD.

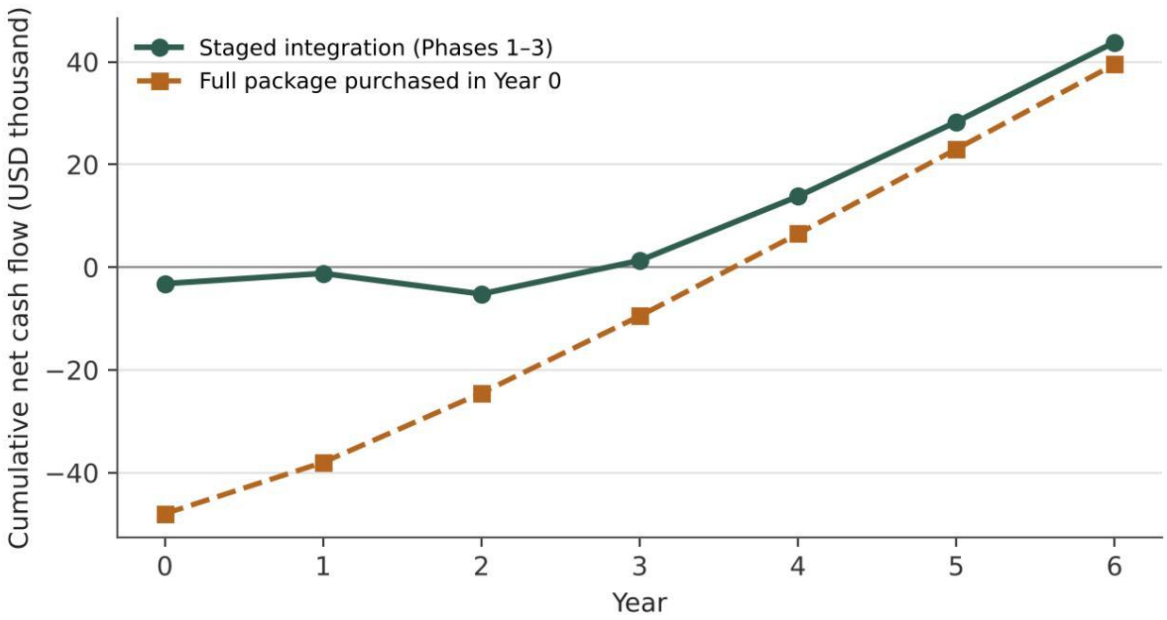
Figura 2 – Flujo de caja neto acumulado (sin descontar) de la integración por etapas frente a la compra de una
Paquete completo de agricultura de precisión en el año 0 en la granja representativa de 600 acres. Caso base

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio.
medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 2, 2026 | Envío: 23 de octubre de 2026 | Aceptación: 28 de octubre de 2026 | Publicación: 2 de noviembre de 2026

supuestos descritos en las Tablas 2 y 3



La estrategia por etapas funciona un poco mejor al final del horizonte por dos razones. Primero, evita el costo de un controlador de tasa variable propio cuyos beneficios, en una granja de 600 acres, se pueden capturar en menor costo a través de la aplicación personalizada. En segundo lugar, pospone los desembolsos de capital hasta que las fases anteriores hayan terminado. generó efectivo y datos, lo que reduce el riesgo de que se compre equipo pero se utilice poco.

Es un resultado frecuente cuando se adoptan paquetes de software antes de que el operador tenga las habilidades o los datos necesarios para utilizarlos.

5.2 Indicadores económicos

Tabla 5 – Indicadores económicos para las dos estrategias (caso base, horizonte de seis años, descuento del 7%) tasa)

Indicador	Estrategia A: Paquete completo	Estrategia B: Por etapas
Desembolso de capital inicial (Año 0)	48.000 dólares estadounidenses	3.200 dólares estadounidenses
Exposición máxima al capital	48.000 dólares estadounidenses	5.200 dólares estadounidenses
Año en el que el flujo de caja acumulado se vuelve positivo.	Año 4	Año 3
Flujo de caja neto acumulado, año 6	39.500 dólares estadounidenses	43.800 dólares estadounidenses
Valor actual neto al 7%	Aproximadamente 20.300 USD	Aproximadamente 30.700 USD
Reducción anual de los costos de insumos a plena capacidad implementación	11–15%	9–13%
Riesgo de subutilización del equipo	Alto	Bajo

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google

ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

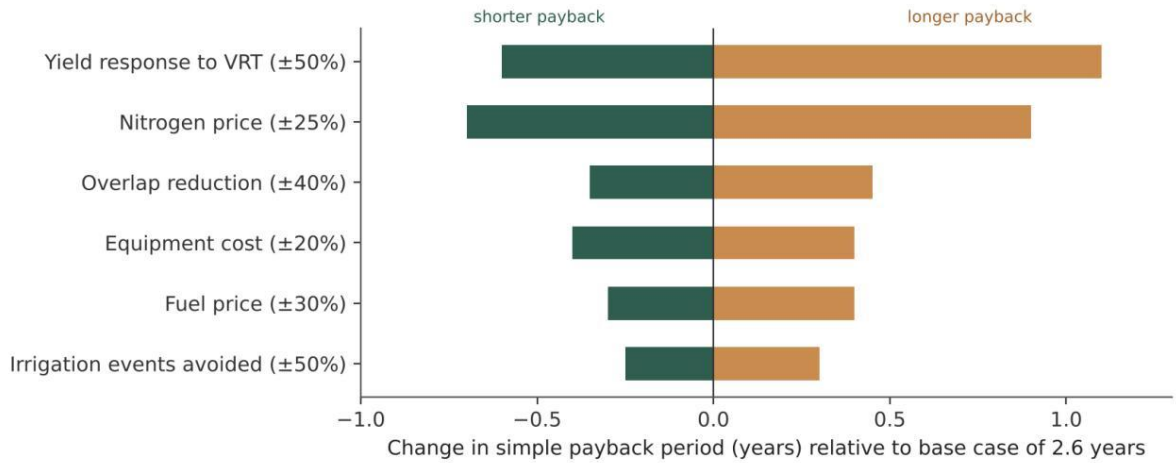
Año VII, vol. 2, 2026 | Envío: 23 de octubre de 2026 | Aceptación: 28 de octubre de 2026 | Publicación: 2 de noviembre de 2026

Las reducciones en los costos de los insumos una vez implementada por completo se sitúan en el rango del 8 al 15 por ciento del gasto afectado,
consistente con los rangos publicados resumidos en la Sección 2 y con los resultados observados en
operaciones comparables. La estrategia por etapas genera ahorros ligeramente menores en los primeros años porque
Se utilizan menos componentes, pero esto se compensa con una exposición al capital mucho menor.

5.3 Sensibilidad

La Figura 3 presenta la sensibilidad del retorno de la estrategia por etapas a seis parámetros. El retorno es
Es más sensible a la respuesta de rendimiento obtenida con prescripciones de tasa variable y a los precios del nitrógeno.
Los precios más altos del nitrógeno acortan el período de recuperación porque cada libra de nitrógeno ahorrada vale más; una débil
La respuesta de rendimiento prolonga el período de recuperación en aproximadamente un año. Costo del equipo, precio del combustible, reducción de la superposición
y los eventos de riego evitados tienen efectos menores. Bajo ningún escenario de un solo parámetro examinado
La recuperación de la inversión de la estrategia por etapas supera los cuatro años.

Figura 3 – Sensibilidad del período de recuperación simple de la estrategia por etapas a parámetros clave (uno a la vez)
Variación temporal en torno a un caso base de 2,6 años). Los rangos se muestran entre paréntesis.



5.4 Resultados agronómicos y operativos

Más allá de los indicadores financieros, el modelo y la experiencia de campo indican varias operaciones
resultados. La estabilidad del rendimiento mejora cuando el riego se programa mediante sensores en lugar de mediante un calendario,
debido al estrés hídrico en etapas críticas (floración en sorgo y maíz, formación de botones florales y cuajado de cápsulas en algodón)
se reduce. La guía y la dirección automática extienden la jornada laboral efectiva, lo cual es importante durante las restricciones.
Ventanas de siembra después de la lluvia. Finalmente, las capas de datos construidas durante la Fase 1 y la Fase 2 brindan soporte.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio.
medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 2, 2026 | Envío: 23 de octubre de 2026 | Aceptación: 28 de octubre de 2026 | Publicación: 2 de noviembre de 2026

Documentación solicitada por prestamistas, aseguradoras de cosechas y compradores, reduciendo el trabajo administrativo:

Un beneficio de los sistemas de precisión que a menudo se pasa por alto.

6. DISCUSIÓN

6.1 Interpretación

Los resultados respaldan la proposición central de este artículo: para las explotaciones agrícolas de tamaño mediano, cómo la agricultura de precisión
La adopción importa tanto como las tecnologías que se adoptan. Un paquete completo puede ser rentable a lo largo del tiempo.
un horizonte de seis años, pero concentra el riesgo en el Año 0 y depende de que el operador adquiera, en un solo
temporada, los datos y las habilidades necesarias para utilizar cada componente. El enfoque por etapas invierte esta lógica.
Comienza con diagnósticos económicos que generan ahorros inmediatos y una base de datos, agrega el
las tecnologías más confiables a continuación, e introduce herramientas que requieren mucha interpretación solo una vez que
La información necesaria para interpretarlas ya está disponible.

Este hallazgo es consistente con el argumento de complementariedad de Lowenberg-DeBoer y Erickson.
(2019) y con la observación de que la tecnología de tasa variable se ofrece cada vez más a través de
proveedores de servicios (Erickson y Lowenberg-DeBoer, 2020). También se alinea con la literatura de extensión
énfasis en "mejor ajuste" en lugar de "mejor práctica" (Birner et al., 2009): la misma tecnología puede ser
rentable en una granja y no rentable en la vecina, dependiendo de la secuencia en la que se encuentre
se presentó y los datos disponibles para respaldarlo.

6.2 El papel de la consultoría

El marco asume que alguien realiza tres funciones que a menudo faltan en las empresas medianas.
Explotaciones agrícolas: diagnóstico agronómico (interpretación de análisis de suelo, datos de sensores e imágenes), modelización financiera.
(calcular el retorno de la inversión con los propios costos de la granja) y capacitación del operador (configuración del equipo y
establecer reglas de decisión simples). Los distribuidores de equipos brindan instalación y capacitación, pero tienen una
incentivo para vender paquetes completos; los especialistas de extensión brindan orientación basada en la investigación pero tienen
tiempo limitado para las granjas individuales; y los agrónomos minoristas proporcionan prescripciones pero están vinculados a insumos.
ventas. Un consultor independiente que combine estas funciones puede secuenciar la adopción en la granja.
interés y documentar los resultados.

Walter's Agribusiness Consulting, LLC aplica este modelo en el condado de Bexar y los condados circundantes.
El enfoque se basa en la experiencia de gestionar operaciones comerciales en el Cerrado brasileño, donde
Las grandes áreas se gestionan con personal reducido y protocolos de campo disciplinados, y se adaptan a estos

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio.
medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 2, 2026 | Envío: 23 de octubre de 2026 | Aceptación: 28 de octubre de 2026 | Publicación: 2 de noviembre de 2026

métodos organizativos para los suelos, cultivos, limitaciones hídricas y redes de servicios del centro-sur
Texas.

Lista de verificación práctica para consultores que aplican el marco de trabajo : • Recopile
registros de insumos, combustible y bombeo de dos a tres años antes de recomendar cualquier equipo.

• Cree la capa de zonas una sola vez y asegúrese de que todos los dispositivos posteriores puedan
leerla. • Utilice servicios personalizados (VRA, imágenes, mapeo de cosechas) antes de adquirir equipos con la misma función.

• Exija una estimación escrita del retorno de la inversión, basada en los datos de la propia explotación, en cada etapa del proceso
de toma de decisiones. • Establezca comparaciones entre parcelas de la propia explotación para que los resultados se demuestren en
los campos del productor. • Limite al operador a una nueva regla de decisión por
temporada. • Documente los resultados en un resumen estacional de una página que también pueda utilizarse con prestamistas y compradores.

6.3 Implicaciones más amplias

Las explotaciones agrícolas medianas gestionan una gran parte de las tierras de cultivo en Texas. Mayor adopción de tecnologías de precisión.
Entre estas granjas se contribuye a los objetivos nacionales de eficiencia en el uso de recursos: menor nitrógeno
pérdidas al agua y al aire, menos pesticidas aplicados fuera de las áreas objetivo, menor consumo de combustible y más
uso eficiente del agua subterránea en regiones donde los acuíferos están bajo presión. Debido a que la etapa
El marco reduce el umbral de capital, amplía el número de granjas para las que la adopción es
financieramente racional y, por lo tanto, los beneficios ambientales y de productividad agregados. También
apoya la resiliencia económica rural al mejorar la rentabilidad de las operaciones familiares que sirven de base
economías locales

6.4 Limitaciones

El análisis tiene varias limitaciones. La granja representativa es una construcción estilizada; las granjas actuales
Difieren en la combinación de cultivos, la antigüedad de los equipos, el acceso al riego y la variabilidad del suelo, factores que influyen en la rentabilidad.
El modelo es determinista y utiliza un análisis de sensibilidad de uno en uno; no captura correlaciones.
entre precios y rendimientos o la distribución completa de los resultados climáticos. Las cifras de tasa de adopción son
Recopilado a partir de varias fuentes con definiciones diferentes y debe interpretarse como indicativo.
Finalmente, los beneficios de una mejor documentación y calidad de las decisiones son difíciles de cuantificar y son
solo parcialmente incluido. El trabajo futuro debería validar el marco con datos de varias temporadas de una
Se selecciona un panel de granjas medianas de la región y se extiende el modelo a la simulación estocástica.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio.
medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 2, 2026 | Envío: 23 de octubre de 2026 | Aceptación: 28 de octubre de 2026 | Publicación: 2 de noviembre de 2026

7. CONCLUSIÓN

La agricultura de precisión ya no está limitada por la disponibilidad de tecnología; para las explotaciones agrícolas de tamaño mediano, está limitada.
por exposición de capital, tiempo del operador y ausencia de rentabilidad demostrada localmente. Una etapa
marco de integración: primero el diagnóstico, segundo la guía y el control, tercero la exploración y el refinamiento, con explícito
puertas de decisión: aborda las tres. En una granja representativa de 600 acres en el centro-sur de Texas,
La compra por etapas reduce la exposición máxima al capital en aproximadamente un 90 por ciento en comparación con una compra de paquete completo.
alcanza un flujo de caja acumulado positivo un año antes y ofrece un valor actual neto más alto (aproximadamente
30.700 USD frente a 20.300 USD). Reducciones de los costes de los insumos de entre el 8 y el 15 por ciento y mayor estabilidad del rendimiento.
son alcanzables cuando las recomendaciones se adaptan a las condiciones locales y se apoyan en la consulta.
que integra diagnóstico, análisis financiero y capacitación. El enfoque genera rendimientos privados para
productores, contribuyendo al mismo tiempo a objetivos más amplios de eficiencia y conservación.

EXPRESIONES DE GRATITUD

El autor agradece a los productores y proveedores de servicios en el centro-sur de Texas y en Goiás, Brasil,
cuya experiencia operativa sirvió de base para las premisas de este artículo.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

El autor es el fundador de Walter's Agribusiness Consulting, LLC, que ofrece servicios de consultoría.
Servicios relacionados con el tema de este artículo. No se recibió financiación externa.

REFERENCIAS

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

Birner, R., Davis, K., Pender, J., Nkonya, E., Anandajayasekeram, P., Ekboir, J., et al. (2009). De las mejores prácticas a la mejor adaptación: Un marco para el diseño y análisis de servicios de asesoramiento agrícola pluralistas en todo el mundo. Journal of Agricultural Education and Extension, 15(4), 341–355.

Erickson, B., y Lowenberg-DeBoer, J. (2020). Encuesta a distribuidores de agricultura de precisión de 2020. Universidad de Purdue y CropLife.

Griffin, TW, Shockley, JM y Mark, TB (2018). Economía de la agricultura de precisión. En DK Shannon, DE Clay y NR Kitchen (Eds.), Fundamentos de la agricultura de precisión. ASA, CSSA y SSSA.

Lowenberg-DeBoer, J., & Erickson, B. (2019). Aclarando las cosas sobre la agricultura de precisión.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google

Año VII, vol. 2, 2026 | Envío: 23 de octubre de 2026 | Aceptación: 28 de octubre de 2026 | Publicación: 2 de noviembre de 2026

adopción. Revista de Agronomía, 111(4), 1552–1569.

McFadden, J., Njuki, E., & Griffin, T. (2023). Agricultura de precisión en la era digital: Adopción reciente en granjas estadounidenses (EIB-248). Servicio de Investigación Económica del USDA.

Schimmelpfennig, D. (2016). Beneficios agrícolas y adopción de la agricultura de precisión (ERR-217). Servicio de Investigación Económica del USDA.

Extensión AgriLife de Texas A&M. (2023). Red TexasET y recursos para la programación del riego. Sistema Universitario Texas A&M.

Servicio de Investigación Económica del USDA. (2023). Tecnologías de agricultura de precisión y rentabilidad agrícola. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

Servicio de Conservación de Recursos Naturales del USDA. (2022). Programa de Incentivos para la Calidad Ambiental: Normas de prácticas de agricultura de precisión y manejo de nutrientes. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.