

# Viabilidade econômica de pulverização agrícola com drones: *uma abordagem por opções reais e simulação de Monte Carlo*

Kaio Gabriel Ribeiro

Mestrando em Administração pela Unesp  
Graduação em Ciências Contábeis pela Imesb  
E-mail: kaio.ribeiro@unesp.br

David Ferreira Lopes Santos

Livre-Docente em Administração pela Unesp  
Doutor em Administração pela Mackenzie  
Email: david.lopes@unesp.br

Recebido: 03 mar. 2026

Aprovado: 25 mai. 2026

**Resumo:** Este estudo avalia a viabilidade econômica de uma empresa de pulverização com drones na Agricultura 4.0. Embora o investimento seja viável em uma análise estática, as simulações revelam um risco elevado, com 27% de chance de prejuízo. Este relato demonstra um processo de gestão do valor econômico de um empreendimento, ao direcionar estratégias de negócio que aumentem a eficiência operacional, adotem contratos flexíveis e contemplem a opção de desinvestimento.

**Palavras-chave:** Agricultura 4.0. Análise de Investimentos. Flexibilidade Gerencial.

**Abstract:** This study evaluates the economic viability of a drone-spraying company in Agriculture 4.0. Although the investment appears viable in a static analysis, simulations indicate high risk, with a 27% chance of loss. This report demonstrates a process for managing the economic value of a venture by directing business strategies that increase operational efficiency, adopt flexible contracts, and consider divestment.

**Keywords:** Agriculture 4.0. Investment Analysis. Managerial Flexibility.

**Resumen:** Este estudio evalúa la viabilidad económica de una empresa de fumigación con drones en el marco de la Agricultura 4.0. Si bien la inversión resulta viable en un análisis estático, las simulaciones revelan un alto riesgo, con una probabilidad de pérdida del 27 %. Este informe presenta un proceso para gestionar el valor económico de la empresa, mediante estrategias comerciales que incrementen la eficiencia operativa, adopten contratos flexibles y consideren la opción de desinversión.

**Palabras clave:** Agricultura 4.0. Análisis de Inversiones. Flexibilidad Gerencial.

## Introdução

A agricultura brasileira, há algum tempo, atravessa um ciclo de transformação tecnológica denominado Agricultura 4.0, no qual a precisão e a eficiência operacional tornaram-se determinantes para a competitividade do setor. Neste cenário, os veículos aéreos não tripulados (VANTs) consolidaram-se como ferramentas estratégicas para a pulverização agrícola, oferecendo vantagens competitivas em relação à aviação agrícola convencional e à utilização de tratores, tais como a redução do amassamento da cultura, a pulverização em terrenos de topografia complexa e a mitigação de riscos ocupacionais (Embrapa, 2024).

Entretanto, a viabilidade da prestação de serviços com drones vai além da eficiência agrônômica do equipamento. O modelo de negócio enfrenta desafios financeiros e logísticos substanciais. A estrutura de capital exige alto investimento em ativos de rápida depreciação tecnológica, enquanto a operação é pressionada por custos logísticos terrestres e pela sazonalidade da demanda agrícola.

O sucesso do empreendimento, portanto, não reside apenas na capacidade de voo da aeronave, mas também na eficiência da gestão para maximizar a taxa de ocupação dos equipamentos e diluir os custos fixos operacionais. Diante da volatilidade inerente ao setor agrícola (caracterizado por oscilações de preços e incertezas climáticas), as ferramentas tradicionais de análise de investimento, como o Valor Presente Líquido (VPL) estático, mostram-se insuficientes, conforme demonstram Caldas e Silva Júnior (2021) em estudos sobre projetos agroindustriais.

Tais métodos assumem fluxos de caixa determinísticos e uma gestão passiva, o que os leva a falhar em captar o valor da flexibilidade gerencial. Em um mercado emergente, a capacidade do gestor de alterar a rota, ou mesmo de exercer a opção de abandonar o projeto para recuperar o capital investido, constitui um ativo econômico real que deve ser quantificado (Heidrich, Morais e Facó, 2021).

O problema central desta pesquisa reside na validação econômica deste modelo de prestação de serviços em condições reais de operação. Adotou-se uma abordagem que integra a análise de investimento ortodoxa, baseada no Fluxo de Caixa Descontado, com métodos estocásticos – a Simulação de Monte Carlo, para a mensuração probabilística do

risco – e a Teoria das Opções Reais, para a valoração da flexibilidade estratégica de abandono, oferecendo um panorama decisório alinhado à complexidade do agronegócio.

## 1) Diagnóstico da situação-problema e plano de ação

### 1.1 A situação-problema: a armadilha da eficiência técnica

O diagnóstico realizado na empresa objeto de estudo revelou um paradoxo comum na Agricultura 4.0: a alta eficiência agronômica não se traduzia proporcionalmente em segurança financeira. A organização, embora equipada com ativos de ponta (Drones DJI Agras T50 – Figura 1), opera em um cenário de margens comprimidas e de alta alavancagem operacional.

A situação-problema central identificada foi a exposição desprotegida ao risco de demanda e de obsolescência. A gestão da empresa baseava suas decisões de investimento em projeções lineares de "dias de voo", desconsiderando a volatilidade climática da região Nordeste do estado de São Paulo e os gargalos logísticos no solo.

Figura 1 – Drone Agras T50 em período de reabastecimento durante aplicação em cana.



Fonte: Imagem cedida pela empresa.

Foram identificados três gargalos latentes na operação:

- i) Sazonalidade climática: A janela de pulverização é estreita. Chuvas excessivas ou ventos acima de 10 km/h paralisam a frota, enquanto os custos fixos (folha de pagamento de pilotos qualificados e depreciação) continuam a ser contabilizados.
- ii) Depreciação acelerada: Diferentemente dos tratores, que depreciam ao longo de 10 anos, os drones e, especificamente, as baterias inteligentes, apresentam ciclos de vida curtos. Diagnosticou-se que, a cada 18 meses, a tecnologia se torna obsoleta ou exige reinvestimento massivo (CAPEX recorrente), o que pressiona o fluxo de caixa.
- iii) Barreiras de saída: A empresa não possuía uma estratégia clara de desinvestimento. Caso o mercado se tornasse desfavorável, não haveria cálculo do momento ótimo para vender os ativos e encerrar a operação, o que criaria o risco de destruição do patrimônio dos sócios.

### *1.2 Oportunidades de melhoria no processo de gestão*

Diante deste cenário, identificou-se a oportunidade de alterar o modelo de gestão financeira da empresa, pois a abordagem tradicional de "Custo + Margem" mostrou-se insuficiente diante dos gargalos operacionais. A oportunidade de melhoria consistiu na implementação da simulação de Monte Carlo.

A melhoria proposta neste relato visa a uma análise dinâmica que valoriza os cenários de incerteza e aponta para o eventual momento de desinvestimento, considerando a carteira de opções reais (direitos) da empresa, na qual a flexibilidade de expandir, esperar ou abandonar o negócio possui valor econômico.

### *1.3 Plano de ação e percurso metodológico*

Para mitigar a imprevisibilidade financeira e instituir uma ferramenta de decisão robusta, o plano de ação foi estruturado em quatro etapas sequenciais e integradas, partindo do diagnóstico estático para a modelagem de flexibilidade estratégica:

**Etapa 1 - Estruturação dos dados e custeio (diagnóstico financeiro):**

- i) Realizou-se o levantamento de todos os custos reais da safra 2024/2025. Os custos foram segregados em fixos e variáveis, permitindo identificar a margem de contribuição por hectare (ha) e respectivo ponto de equilíbrio.
- ii) mapeamento do investimento de capital e do giro no início e definição da vida útil econômica dos ativos (5 anos para o projeto, com ciclos menores para baterias).
- iii) Definição da Taxa de Desconto: Calculou-se a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) real de 12,34% a.a., pelo modelo de precificação de ativos de capital (CAPM), ajustado ao risco Brasil e à inflação.

**Etapa 2 - Construção do fluxo de caixa descontado (FCD):**

- i) Elaborou-se o cenário base (determinístico), projetando as receitas com base na capacidade operacional atual da empresa, considerando a média das três equipes.
- ii) Premissas fiscais: Consideraram-se a tributação pelo Simples Nacional e a depreciação arbitrada pela Receita Federal e pela gerência dos equipamentos.

**Etapa 3 – Modelagem de risco (Simulação de Monte Carlo) utilizando o Microsoft Excel®.**

- i) Foram modelados 1.000 cenários distintos, cada um composto por 5 variações anuais independentes da demanda de serviços por hectare (ha), que representam o comportamento aleatório da safra ao longo do tempo.
- ii) O processamento gerou uma distribuição de 1.000 valores de Valor Presente Líquido (VPL), permitindo não apenas mensurar a probabilidade de prejuízo, mas também avaliar a dispersão dos resultados em relação à média esperada.

Etapa 4 – Valoração da Flexibilidade (Opções Reais): aplicou-se o modelo binomial recombinante para valorar a opção de abandono.

- i) A volatilidade do valor econômico da empresa foi calculada com base no coeficiente de variação dos VPLs obtidos na SMC. Este parâmetro foi utilizado para calibrar a subida e a descida dos nós da árvore binomial.
- ii) Utilizou-se a abordagem probabilística neutra ao risco para valorar, de forma decrescente, a opção de abandono, considerando o valor de encerramento da firma em cada ano.

## 2) Embasamento técnico e científico

### 2.1 *A economia dos drones na agricultura 4.0: eficiência técnica versus gargalos operacionais*

A literatura recente sobre Agricultura de Precisão (AP) consolidou o entendimento de que a introdução de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) promove ganhos agrotécnicos significativos. No entanto, a viabilidade econômica desta tecnologia ainda é objeto de debate. Embora Pathak et al. (2020) argumentem que a redução de custos operacionais (mão de obra e diesel) justifica o investimento, autores mais críticos, como Erickson e Fausti (2021), alertam que a adoção tecnológica na agricultura é frequentemente refreada por barreiras de *CAPEX* e pela própria obsolescência dos equipamentos.

No contexto brasileiro, a literatura aponta um desafio adicional: a logística de solo. Em estudos locais da Embrapa (2024), sugere-se que a autonomia limitada das baterias (gargalo tecnológico) transfere a pressão por eficiência para a equipe de apoio, criando uma dependência crítica na gestão de processos. Diferentemente da mecanização pesada, em que o ativo opera continuamente, o modelo de negócios de drones caracteriza-se por ciclos operacionais curtos e intensos, o que o torna altamente sensível a paradas não planejadas e à variabilidade climática.

### 2.2 *Investimento sob incerteza: a limitação do VPL tradicional*

A avaliação de projetos inovadores no agronegócio tem sido historicamente dominada pelos métodos FDC e VPL. Contudo, Dixit e Pindyck (2012) já estabeleciam que o VPL falha ao assumir que as decisões de investimento são do tipo "agora ou nunca" e que os fluxos de caixa futuros seguirão uma trajetória determinística média.

No contexto do agronegócio, a aplicação de modelos estáticos de avaliação torna-se enviesada diante da exposição do setor a choques exógenos. Capitani e Gaio (2023), ao analisarem a transmissão de volatilidade durante crises geopolíticas recentes, demonstram empiricamente que os mercados agrícolas brasileiros são altamente permeáveis às flutuações globais de preços e de custos de energia. Essa constatação invalida o uso de taxas de desconto constantes e exige a adoção de ferramentas estocásticas, capazes de modelar o risco não como um fator penalizador estático, mas como uma variável dinâmica que, se gerida corretamente, pode revelar oportunidades de valor.

A análise de rentabilidade sob condições de risco é fundamental para a sobrevivência de novos modelos de negócio. Vargas e Brito (2024) destacam que as variações nos retornos financeiros são sensíveis à estrutura de capital e ao ambiente de mercado, reforçando a necessidade de simulações estocásticas para validar a sustentabilidade de investimentos de alto CAPEX.

Ao aplicar o VPL estático a tecnologias emergentes, o analista tende a subavaliar o projeto, pois ignora a capacidade gerencial de reagir a novas informações, seja expandindo a frota em cenários favoráveis, seja abandonando a operação para recuperar o valor residual em cenários adversos (Trigeorgis, 1996). Essa rigidez metodológica cria o que Mun (2006) chama de "armadilha da subavaliação", ao desestimular a inovação em setores de capital intensivo.

### *2.3 A abordagem estocástica: simulação de Monte Carlo e teoria das opções reais*

Para superar as limitações determinísticas, a literatura contemporânea propõe a integração da Simulação de Monte Carlo (SMC) à Teoria das Opções Reais (TOR). A SMC permite modelar a incerteza de múltiplas variáveis de entrada simultaneamente (preço do serviço, custo de bateria, produtividade/ha), gerando uma distribuição de probabilidades para o VPL em vez de um número único (Albright; Winston, 2020)

Mais especificamente na adoção de tecnologia agrícola, Spiegel, Britz e Finger (2021) demonstram, por meio de modelos de Opções Reais, que a aversão ao risco e à incerteza de mercado atrasam a adoção de tecnologias, mas que a flexibilidade (opção de esperar ou abandonar) tem um valor econômico quantificável que "protege" o investidor contra o risco de cauda.

A aplicação da modelagem estocástica em ativos agrícolas permite uma visão prospectiva do risco de inviabilidade. Conforme demonstrado por Lucas et al. (2022), o uso de iterações via Monte Carlo possibilita ao gestor visualizar a distribuição de probabilidades do retorno, garantindo que a decisão de investimento em novas tecnologias não seja pautada apenas em projeções lineares, mas também em cenários de estresse.

Metodologicamente, a abordagem de Copeland e Antikarov (2001), utilizada neste trabalho, oferece uma vantagem prática ao derivar a volatilidade do projeto a partir da própria SMC. Isso resolve o problema da falta de ativos gêmeos negociados em bolsa para pequenas empresas do agronegócio, permitindo uma precificação endógena e robusta das opções estratégicas, conforme defendido por Brandão, Dyer e Hahn (2005) no contexto brasileiro.

### 3) Análise da situação investigada

#### 3.1 Análise do investimento inicial

A estruturação da empresa para a safra 2024/25 demandou um aporte total de capital de R\$ 1.134.583,67. Este montante viabilizou a aquisição de três *kits* operacionais (compostos por drone DJI Agras T50, veículo e periféricos) e a infraestrutura administrativa básica.

Tabela 1 – Composição do investimento inicial

Grupos de investimento	Item / Descrição	Valor Unitário (R\$)	Qtd	Valor Total (R\$)	Part (%)
Kits Operacionais	Drone DJI Agras T50	105.000	3	315.000	27,76%
	Veículo utilitário	100.000	3	300.000	26,44%
	Conjunto de baterias (3 un/equipe)	60.000	3	180.000	15,86%
	Carreta de apoio	30.000	3	90.000	7,93%
	Gerador de energia	25.000	3	75.000	6,61%
	Carregador inteligente	15.000	3	45.000	3,97%
	Misturador e equipe. Apoio	17.500	3	52.500	4,63%
Infraestrutura Global	Capital de giro	55.083	1	55.083	4,85%
	Computadores e TI	12.000	1	12.000	1,06%
	Móveis e escritório	10.000	1	10.000	0,88%
				1.134.583	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir dos resultados da pesquisa.

Nota-se que apenas as aeronaves e os veículos de logística terrestre representam, juntos, mais de 54% do investimento. Isso evidencia que, embora a tecnologia de drones seja a base do negócio, a logística de apoio é um componente de custo de capital tão oneroso e fundamental quanto os próprios equipamentos de voo.

### 3.2 Eficiência técnica e análise de ociosidade

Um dos achados mais relevantes do estudo é a diferença entre a capacidade técnica especificada pelo fabricante e a produtividade efetiva observada em campo. O equipamento em questão (DJI AGRAS T50) possui especificações técnicas que permitem alta produtividade em campo, porém, fatores logísticos impõem limitações à operação.

A seguir, é possível verificar os parâmetros técnicos de voo informados pela fabricante (DJI, 2025) comparados com a realidade operacional média registrada pelas três equipes trabalhando em média 20 dias por mês e 6 horas por dia:

Tabela 2 – Capacidade teórica X Produtividade realizada

Especificações Técnicas (DJI AGRAS T50)	
Volume do Tanque (l)	40
Vasão (l/ha)	15
Velocidade de voo (m/s)	7
Largura da faixa (m)	9
Capacidade Técnica	
Hectares por voo	2,67
Voo completo (aplicação + manobras + pit stop)	15,11 min
Hectares p/hora	10,59
Hectares p/dia	63,54
Hectares p/mês	1.270,44
Realizado no Período	
Total produzido por equipe p/mês (ha)	451,85
Total produzido por equipe p/dia (ha)	22,59
Total produzido por equipe p/hora (ha)	3,77

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir dos resultados da pesquisa.

Os dados da Tabela 2 revelam um alto índice de ociosidade técnica em relação ao potencial teórico da aeronave. Conforme diagnosticado anteriormente, a principal restrição produtiva não decorre da capacidade do equipamento, mas dos gargalos logísticos nas operações de solos (trocas de baterias, reabastecimento e deslocamentos) e da disponibilidade comercial das áreas. Com isso, a estrutura de custos fixos, dimensionada para a capacidade máxima, acaba onerando a margem do que é efetivamente realizado. Sendo assim, a otimização da logística é a principal alavanca para aumentar a margem de contribuição do negócio.

### *3.3 Desempenho operacional e estrutura de custos*

A operação totalizou 12.199,84 hectares pulverizados ao longo de 9 meses, resultando em média mensal de aproximadamente 451 hectares por equipe. Para sustentar essa operação, a estrutura de custos foi segregada em custos variáveis (diretamente atrelados à área de voo) e fixos (estruturais).

**Custos Variáveis e Fixos:** Os custos variáveis da operação no período analisado registraram média de R\$ 14,41 por hectare. A apuração evidencia que o custo energético terrestre – especificamente o combustível dos veículos de apoio e dos geradores – corresponde a aproximadamente metade desse valor. Isso demonstra que um dos principais fatores de custo variável não está atrelado ao ativo tecnológico principal (drone), mas sim à infraestrutura logística de suporte necessária à operação em campo. Em relação aos custos fixos necessários para manter a estrutura administrativa e as três equipes operacionais, a projeção anual é de R\$ 495.753,00. Destaca-se que o capital humano (composto por salários, encargos trabalhistas, segurança do trabalho e pró-labore) corresponde a mais de 90% dessa estrutura de gastos. Essa concentração indica uma alta alavancagem operacional, limitando severamente a flexibilidade da empresa para reduzir custos em períodos de entressafra sem recorrer à demissão de pessoal técnico especializado, o que eleva o ponto de equilíbrio nos meses inativos.

### *3.4 Análise de viabilidade econômico-financeira*

A avaliação da viabilidade financeira foi estruturada por meio do FDC, segregando o valor da empresa em dois componentes temporais: o período explícito (5 anos) e o valor terminal (perpetuidade). Utilizou-se como TMA o patamar de 12,34% a.a., definido pelo CAPM, conforme estabelecido na seção do percurso metodológico.

Antes da análise do retorno sobre o capital investido, avaliou-se a saúde operacional do negócio com base na média dos resultados da SMC. A projeção demonstrou uma receita líquida média anual de R\$ 989.419,80 frente aos custos operacionais. O EBITDA médio consolidado foi de R\$ 317.561,00 por ano, o que resulta em uma margem de EBITDA de 32,1%. Este indicador confirma que a operação apresenta alta eficiência na conversão de receita bruta em caixa operacional antes de investimentos e impostos.

O objetivo da tabela 3 é detalhar os principais indicadores econômico-financeiros, a fim de apresentar os resultados dos investimentos, seguindo as premissas detalhadas na seção de materiais e métodos desse trabalho.

Tabela 3 – Principais Indicadores

Indicador	Valor
VPL DO FLUXO DE CAIXA (R\$)	364.676
TIR	10%
MTIR	6%
MARGEM DE CONTRIBUIÇÃO (P/ha)	77,59
PONTO DE EQUILIBRIO (ha)	709,93
PAYBACK (meses)	42,5
PAYBACK AJUSTADO (meses)	65

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir dos resultados da pesquisa.

Tabela 4 – Fluxo de caixa descontado a partir da média da SMC

Ano	0	1	2	3	4	5
Ha produzidos (SMC)		12.262	12.237	12.220	12.148	12.239
Preço por Ha		92	92	92	92	92
<i>Item</i>						
(+) Receita bruta		1.128.066	1.125.811	1.124.262	1.117.603	1.125.962
(-) Simples nacional (12%)		135.368	135.097	134.911	134.112	135.115
(=) Receita líquida		992.698	990.714	989.351	983.490	990.846
(-) Custos variáveis		176.689	176.336	176.094	175.051	176.360
(=) Margem de contribuição bruta		816.009	814.378	813.257	808.440	814.486
(-) Custos fixos		495.753	495.753	495.753	495.753	495.753
(=) EBTIDA		320.256	318.625	317.504	312.687	318.733
(-) Investimento	1.134.584	-	-	100.000	-	-
(=) Fluxo de Caixa Livre	1.134.584	320.256	318.625	217.504	312.687	318.733
Fluxo de caixa descontado	1.134.584	285.084	252.483	153.425	196.343	178.160

Perpetuidade 433.762

Fonte: Elaborado pelos autores, a partir dos dados da pesquisa.

A análise segregada do fluxo de caixa revela uma dinâmica financeira crítica: o VPL estritamente operacional do projeto (soma dos fluxos descontados dos anos 1 a 5 menos o investimento inicial) é negativo em R\$ 69.089,00. Isso indica que, exclusivamente pela prestação de serviços no horizonte de 5 anos, o negócio não gera caixa suficiente para remunerar o capital investido à TMA de 12,34%.

A reversão para um VPL final positivo de R\$ 364.676 ocorre exclusivamente pelo valor residual (perpetuidade) dos ativos ao final do período. Isso demonstra que a viabilidade do empreendimento depende fortemente da preservação do valor de mercado dos equipamentos (drones e veículos) e de sua liquidez.

Nota-se que a MTIR registrou 10,81%, o que a situa ligeiramente abaixo da TMA. Este fenômeno ocorre devido à premissa conservadora adotada no reinvestimento dos fluxos intermediários e ao impacto do CAPEX de reposição no Ano 3. A leitura conjunta indica que, embora a rentabilidade percentual estrita seja pressionada pelos custos de manutenção, o projeto acumula valor absoluto (VPL) devido à escala da operação e à recuperação do capital por meio da venda de ativos.

Dessa forma, conclui-se que os principais indicadores operam marginalmente em relação aos seus valores de referência. No entanto, a SMC indica que a capacidade ociosa dos equipamentos representa uma oportunidade: pequenos ajustes na produtividade podem transformar os cenários econômicos e as percepções sobre a tomada de decisão dos empresários.

### 3.5 Análise de risco pela simulação de Monte Carlo

Dada a sensibilidade dos indicadores identificada na análise determinística, a SMC revelou-se crucial para mapear a exposição real ao risco do investimento. Ao simular 1.000 iterações de produtividade, com um desvio padrão de 15% sobre a área-base de 12,2 mil ha, considerando a média “0” para um perfil de distribuição normal, a frequência dos possíveis VPLs apresentou uma dispersão que fundamenta a necessidade de uma gestão ativa (Tabela 5).

Tabela 5 – Estatística da Simulação de Monte Carlo

Parâmetro	Resultado
VPL Médio	364.676
VPL Máximo	2.260.961
VPL Mínimo	- 1.687.098
Probabilidade de sucesso (VPL>0)	73%

Elaborado pelo autor, a partir dos resultados da pesquisa.

Os resultados da simulação demonstram que o projeto tem viabilidade provável, com 73% de chance de gerar valor positivo. O VPL médio de R\$ 364.676 ratifica a tendência central observada no cenário base, porém, a amplitude entre os valores máximos e mínimos revela alta sensibilidade à escala operacional.

### 3.6 Valor da flexibilidade gerencial (modelagem binomial)

Diante da incerteza mapeada na análise de sensibilidade, utilizou-se a Teoria das Opções Reais (TOR) para avaliar a flexibilidade de abandonar o projeto e liquidar os ativos. Diferentemente do VPL estático, que assume um compromisso passivo até o fim do horizonte de planejamento, a TOR permite modelar a decisão racional do gestor de interromper as perdas.

Para a construção das árvores binomiais, adotaram-se as premissas de liquidação dos ativos que compõem o valor de exercício da opção de abandono. Os valores abaixo representam o montante líquido que retornaria ao investidor caso a operação fosse interrompida em cada um dos marcos temporais.

Tabela 6 – Projeção do Valor Líquido de Abandono ( $X_t$ ) baseada no CAPEX

COMPONENTE DE VALOR	ANO 1	ANO 2	ANO 3	ANO 4	ANO 5
(+) Venda: Alta Tecnologia	378.000	302.400	241.920	193.536	154.828
(-) Depreciação: Drones/Bat/Carregadores	30%	20%	20%	20%	20%
(+) Venda: Equip. Apoio	108.375	97.537	87.783	79.005	71.104
(-) Depreciação: Gerador/Misturador	15%	10%	10%	10%	10%
(+) Venda: Veículos	331.500	298.350	268.515	241.663	217.497
(-) Depreciação: FIPE Padrão	15%	10%	10%	10%	10%
VALOR BRUTO DE VENDA	817.875	698.287	598.218	514.204	443.430
(-) Custos Rescisórios	39.055	44.913	51.650,24	59.397	68.307
(-) Custos adm/Baixa CNPJ	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00
VALOR DE EXERCÍCIO ( $X_t$ )	768.820	638.374	531.569	439.807	360.123

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir dos resultados da pesquisa.

A análise da Tabela 7 revela um comportamento assimétrico fundamental para a estratégia de desinvestimento sob a ótica da TOR. Observa-se que o Valor de Exercício sofre uma erosão de 52,8% entre o Ano 1 (R\$ 763,8 mil) e o Ano 5 (R\$ 360,1 mil). Este fenômeno é impulsionado pelo "efeito tesoura" de dois vetores opostos: a depreciação acelerada dos ativos tecnológicos e o crescimento do passivo trabalhista.

Tabela 7 - Parâmetros para construção das árvores binomiais

Parâmetros	Resultados
Ativo Subjacente ( $S_0$ )	1.499.259
Tempo (anos)	5
Taxa livre de risco	9,30%
Volatilidade	39,26%
Passos (n)	1
dt (Delta T)	1
u (sobe)	1,419067549
d (desce)	0,70468809
p (probabilidade)	0,549864509

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir dos resultados da pesquisa.

Com base nos parâmetros calculados, procedeu-se à modelagem da árvore de eventos (quadro 1), que projeta o valor do ativo subjacente sem a flexibilidade gerencial.

O objetivo é identificar os cenários em que o valor de continuidade do projeto se torna inferior ao de liquidação dos ativos.

Quadro 1 - Árvore de Eventos: Evolução do Valor

Saída	763.820	638.374	531.569	439.807	360.123	
Ano	0	1	2	3	4	5
					7.210.392	10.677.740
				4.868.984		4.868.984
			3.287.894		3.287.894	
VP estático	2.220.227			2.220.227		2.220.227
1.499.260		1.499.260			1.499.260	
	1.012.410			1.012.410		1.012.410
		683.653			683.653	
			461.653			461.653
				311.742		
						210.511

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir dos resultados da pesquisa.

O Quadro 1 ilustra a difusão estocástica do valor do negócio ao longo do horizonte de planejamento, calibrada com uma volatilidade de 39,26%. A amplitude da árvore evidencia a incerteza crítica do projeto: enquanto o ramo superior projeta um alto valor acumulado, a extremidade inferior revela que, no pior cenário, o valor de operação da empresa (R\$ 210.511) torna-se significativamente inferior ao seu valor líquido de liquidação (R\$ 360,1 mil). Nessa zona crítica, o negócio “vale mais morto do que vivo”.

Diante do risco de destruição de valor evidenciado, a Figura 3 apresenta a racionalidade gerencial por meio do método de indução reversa. O modelo otimiza a decisão ao substituir os fluxos operacionais insuficientes dos nós inferiores pelos valores de exercício (liquidação dos ativos), atuando como um mecanismo de *hedge*.

Essa otimização, aplicada retroativamente, eleva o valor presente do projeto para R\$ 1.504.960. A diferença entre o VPL Expandido e o valor estático isola o valor da flexibilidade estratégica, comprovando que a opção de sair do negócio de forma planejada minimiza perdas extremas e agrega valor real ao investimento.

Esse cenário incentiva a continuidade operacional, validando que o investimento em drones DJI T50 possui uma base operacional sólida que justifica o capital exposto ao risco.

Quadro 2 - Árvore de Eventos: Evolução do Valor

Ano	0	5	4	3	2	1
-----	---	---	---	---	---	---

10.677.740					
4.868.984	7.210.392	4.868.984			
2.220.227	3.287.894	2.220.227	3.287.894	2.220.227	<b>VP expandido</b>
1.012.410	1.499.260	1.012.410	1.499.260	1.025.555	<b>1.504.960</b>
461.653	683.653	1.012.410	713.970		
360.123	439.807	531.569			

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir dos resultados da pesquisa.

Essa otimização nos ramos descendentes se propaga retroativamente até o ano 0, elevando o valor presente do projeto para R\$ 1.504.960. A diferença entre este resultado e o valor inicial isola matematicamente o valor da flexibilidade estratégica, demonstrando que a possibilidade de sair do negócio de forma planejada reduz o risco de perda extrema e acrescenta valor real ao investimento.

Tabela 8 - Valoração da Opção Real de Abandono

Componente de valor	Valor Calculado
(A) VP Expandido	1.504.960
(B) VP Estático	1.499.260
Valor da Opção Real de Abandono (A-B)	5.700,13

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados fornecidos pela empresa.

Ao incorporar a curva real de depreciação dos ativos e os custos friccionais de saída (passivos trabalhistas e administrativos), obteve-se um valor de opção de R\$ 5.700,13. Embora esse montante seja financeiramente modesto em relação ao VP total, sua interpretação implica uma avaliação do processo de gestão do valor da empresa a partir dos riscos que a cercam.

O baixo valor da opção indica que, na vasta maioria dos cenários projetados pela SMC e pela árvore binomial, o valor de continuidade da operação supera o de liquidação. Em termos práticos, a empresa gera consistentemente mais riqueza operando do que vendendo, o que demonstra a robustez do modelo de negócio frente à volatilidade normal do mercado agrícola.

Isso só agrega valor tangível em cenários de *downside* extremo, especialmente nos primeiros 12 meses, quando a liquidez dos equipamentos novos ainda é alta. Nos períodos subsequentes, o "efeito tesoura" (caracterizado pela depreciação tecnológica acelerada e pelo acúmulo de passivos rescisórios) cria uma barreira natural à saída.

## Considerações finais

Este estudo consolida a aplicação de um *framework* metodológico tripartite (FCD, SMC e TOR) como suporte à decisão para empreendedores na fronteira tecnológica da Agricultura 4.0. A principal contribuição gerencial evidencia que a viabilidade financeira da pulverização com drones não reside na tentativa de eliminar as incertezas inerentes ao setor, mas no rigoroso controle do ciclo de vida dos ativos e no monitoramento do ponto de equilíbrio entre a depreciação tecnológica e o custo de saída do negócio.

Adicionalmente, os resultados demonstram que o sucesso financeiro da operação é menos dependente da autonomia de voo das aeronaves e altamente sensível à eficiência logística no solo. Conclui-se que o VPL do empreendimento é maximizado quando a gestão se concentra na redução da ociosidade técnica e na otimização dos sistemas de suporte. Por fim, a valoração da flexibilidade estratégica comprovou matematicamente que a capacidade de desinvestir tempestivamente (Opção de Abandono) atua como um mecanismo de proteção ativo, permitindo ao investidor recuperar o capital e minimizar perdas em cenários operacionais extremos.

## Referências

ALBRIGHT, S. C.; WINSTON, W. L. **Business analytics**: data analysis and decision making. [S. l.]: Cengage, 2020.

BRANDÃO, L. E.; DYER, J. S.; HAHN, W. J. Using Binomial Decision Trees to Solve Real-Option Valuation Problems. **Decision Analysis**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 69–88, jun. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/deca.1050.0040>. Acesso em: 04 dez. 2025.

CALDAS, A. V. S.; SILVA JÚNIOR, A. F. de A. da. Comparative evaluation of investment analysis methods: an application in renewable energy auctions between 2011 e 2015. **Revista de Administração da UFSM**, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 693–715, out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1983465955255>. Acesso em: 02 dez. 2025

CAPITANI, D. H. D.; GAIO, L. E. Volatility Transmission in Agricultural Markets: Evidence from the Russia-Ukraine Conflict. **International Journal of Food and Agricultural Economics (IJFAEC)**, [S. l.], abr. 2023.

COPELAND, T. E.; ANTIKAROV, V. **Real options**: a practitioner's guide. [S. l.]: Texere, 2001.

DIXIT, R. K.; PINDYCK, Robert S. **Investment under Uncertainty**. [S. l.]: Princeton University Press, 2012.

**DJI AGRAS T50.** [S. l.]: DJI, 2025. Disponível em: <https://ag.dji.com/pt-br/t50>. Acesso em: 29 out. 2025.

EMBRAPA. **Uso de drones agrícolas no Brasil: da pesquisa à prática.** [S. l.]: EMBRAPA, 2024. Disponível em: <https://revistaavag.org.br/avaliacao-de-custos-operacionais-de-avioes-agricolas-drones-agricolas-e-pulverizadores-terrestres-no-contexto-brasileiro/>. Acesso em: 14 out. 2025.

ERICKSON, B.; FAUSTI, S. W. The role of precision agriculture in food security. **Agronomy Journal**, [S. l.], v. 113, n. 6, p. 4455–4462, nov. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agj2.20919>. Acesso em: 04 dez 2025.

HEIDRICH, F.; MORAIS, D. M. G. de; FACÓ, J. F. B. A teoria de opções reais na gestão de investimentos na Indústria 4.0: um estudo de caso. **Revista de Gestão, Finanças e Contabilidade**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 60–85, maio 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.18028/rgfc.v10i2.7304>. Acesso em: 02 dez. 2025.

LUCAS, Paulo Italo Jordão de; SANTOS, David Ferreira Lopes; SABBAG, Omar Jorge; QUEIROZ, Timóteo Ramos. Análise de viabilidade econômica para a renovação de equipamentos na produção da cana-de-açúcar: um estudo de caso nas operações de tratamentos culturais. **Revista Capital Científico - Eletrônica**, [S. l.], v. 20, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/2177-4153.20220005>. Acesso em: 19 dez 2025.

MUN, J. **Real options analysis: tools and techniques for valuing strategic investments and decisions.** [S. l.]: John Wiley & Sons, 2006.

PATHAK, H. et al. **Use of Drones in Agriculture: Potentials, Problems and Policy Needs.** [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <http://niam.res.in/sites/default/files/pdfs/Use-of-Drone-in-Indian-Agriculture.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2025.

SPIEGEL, A.; BRITZ, W.; FINGER, R. Risk, Risk Aversion, and Agricultural Technology Adoption: a novel valuation method based on real options and inverse stochastic dominance. **Q Open**, [S. l.], v. 1, n. 2, ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/qopen/qoab016>. Acesso em: 04 dez 2025.

TRIGEORGIS, L. **Real options: managerial flexibility and strategy in resource allocation.** [S. l.]: MIT Press, 1996.

VARGAS, J.; BRITO, D. L. da S. Crises econômicas, política cambial e taxa de câmbio: uma análise do Brasil entre 1994 e 2021. **Revista Capital Científico - Eletrônica**, [S. l.], v. 22, n. 1, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/2177-4153.20240005>. Acesso em: 19 dez 2025.