



(X) Graduação () Pós-Graduação
(X) Artigo completo () Relato de prática () Resumo expandido

PARA ALÉM DOS CUSTOS: arquiteturas de risco e logística como dimensões estruturantes da eficiência econômica na produção florestal no agronegócio

Marcelly Cassiane Miranda
Universidade Estadual do Centro-Oeste – UNICENTRO
marcellycmiranda18@gmail.com

Telma Regina Stroparo
Universidade Estadual do Centro-Oeste – UNICENTRO
telma@unicentro.br

Tatiane Ferreira
Universidade Estadual do Centro-Oeste – UNICENTRO
tatiferreira577@gmail.com

RESUMO

A eficiência econômica na produção florestal tem sido tratada, com frequência, como resultado da contenção de gastos diretos e da melhoria isolada de indicadores de custo. Essa leitura é insuficiente para explicar o desempenho de sistemas produtivos submetidos a sazonalidade, restrições de infraestrutura, heterogeneidade espacial dos povoamentos, volatilidade contratual e disrupções operacionais. Este artigo desenvolve uma abordagem teórico analítica que reposiciona risco e logística como dimensões estruturantes da eficiência econômica, e não como variáveis acessórias. O estudo adota revisão integrativa qualitativa de literatura internacional recente, ancorada em clássicos da gestão de custos, da logística e da teoria do risco, e articulada a estudos aplicados sobre colheita, transporte, planejamento florestal e resiliência da cadeia de suprimento. O argumento central sustenta que a eficiência advém da coordenação entre exposição ao risco, consumo de capacidade logística e inteligibilidade dos custos. Com base nesse argumento, propõe-se a abordagem RCL, que integra risco, custo e logística em um mesmo quadro explicativo e culmina em uma matriz analítica para classificar tipologias de risco segundo probabilidade de ocorrência, impacto econômico, impacto logístico e criticidade. A principal contribuição do artigo reside em mostrar que a mensuração contábil ex post precisa ser substituída por uma inteligência de custos orientada por processos, fluxos e vulnerabilidades. A abordagem proposta amplia a capacidade explicativa da literatura e oferece base conceitual para estudos empíricos futuros na produção florestal.

Palavras-chave: Produção florestal; Eficiência econômica; Risco; Logística; Gestão estratégica de custos.



1 INTRODUÇÃO

A produção florestal opera em um ambiente no qual a materialidade econômica do desempenho não se esgota na soma dos dispêndios contábeis. Cortar, arrastar, estocar, consolidar cargas, acessar estradas secundárias, sincronizar janelas industriais e responder a eventos disruptivos compõem um sistema de fluxos cuja eficiência depende de coordenação temporal, espacial e contratual. Por isso, reduzir a análise econômica ao registro de custos médios equivale a obscurecer a forma pela qual o valor é preservado ou destruído ao longo do processo produtivo (Lopes & Stroparo, 2022)

A literatura florestal recente mostra que os gargalos mais persistentes surgem menos de um único item de gasto e mais da interação entre complexidade operacional, restrições logísticas e exposição a riscos. A revisão Auer & Rauch (2021) demonstra que os riscos da cadeia madeireira não se distribuem de modo homogêneo, atingem diferentes elos com intensidades distintas e exigem estratégias de mitigação que combinam estoques, contratos, colaboração e flexibilidade operacional. Na mesma direção, Roos (2023) mostra que danos florestais, incêndios, ventos e surtos bióticos alteram simultaneamente oferta, qualidade da madeira, urgência de remoção e desenho dos fluxos de abastecimento. Em paralelo, as revisões de Audy et al. (2022) e Malladi & Sowlati (2017) indicam que o transporte de madeira concentra parcela elevada dos custos operacionais e constitui um problema de planejamento intrinsecamente complexo, no qual roteirização, capacidade, filas, sazonalidade e restrições viárias reconfiguram o desempenho econômico (Lopes & Stroparo, 2022; Zielinski & Stroparo, 2023)

Esse quadro expõe a limitação das abordagens centradas exclusivamente na contabilidade de custos tradicional. Sistemas convencionais tendem a capturar o resultado monetário depois que a ineficiência já ocorreu e, por isso, oferecem pouca visibilidade sobre a origem processual do gasto. A tradição do custeio baseado em atividades, consolidada por Kaplan & Cooper (1997) e simplificada por Kaplan & Anderson (2007), desloca o foco para o consumo de recursos por atividades e abre caminho para uma leitura mais aderente à heterogeneidade operacional. No setor florestal, Nurminen et al. (2009) mostram que a lógica ABC permite rastrear custos de corte, extração e transporte até o nível do lote, revelando como a fragmentação dos sortimentos e a dispersão espacial ampliam tempos de *sorting*, transbordo e deslocamento. Assim, a logística deixa de aparecer como despesa final e passa a ser reconhecida como mecanismo gerador de custo.

Do ponto de vista analítico, o problema é ainda mais profundo. A eficiência econômica na produção florestal não depende apenas do quanto custa produzir, mas de como os riscos alteram o custo e de como a logística transforma risco em resultado econômico. A tradição da gestão estratégica de custos, representada por Shank & Govindarajan (1993), insiste que o custo deve ser compreendido em conexão com posicionamento, cadeia de valor e direcionadores estruturais. Na produção florestal, essa premissa implica reconhecer que rede viária, regime climático, janelas de colheita, seleção contratual, confiabilidade mecânica e coordenação entre agentes são dimensões que moldam o custo antes mesmo de ele ser mensurado (Zielinski & Stroparo, 2023)

Diante disso, o problema de pesquisa pode ser formulado da seguinte maneira: de que modo risco e logística, integrados à análise de custos, oferecem maior capacidade explicativa para compreender a eficiência econômica na produção florestal. O objetivo do artigo é analisar, em perspectiva teórica, o papel dos riscos e da logística como dimensões estruturantes da eficiência econômica na produção florestal e desenvolver uma abordagem analítica integrada, denominada RCL, capaz de superar leituras fragmentadas. A contribuição teórica proposta consiste em reposicionar a eficiência como resultado de uma arquitetura relacional entre vulnerabilidades, fluxos e custos, e não como simples decorrência de contenção de gastos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CUSTOS E GESTÃO ESTRATÉGICA NA PRODUÇÃO FLORESTAL

A contabilidade de custos clássica foi concebida para medir estoques, apurar resultados e apoiar decisões em ambientes relativamente estáveis. Essa origem explica sua dificuldade em lidar com operações nas quais a variabilidade do processo é parte constitutiva da produção (Stroparo et al., 2024). Kaplan & Cooper (1997) argumentam que sistemas agregados perdem capacidade de discriminar a economia da complexidade, ocultando o peso de atividades indiretas, retrabalho e capacidade ociosa. Kaplan & Anderson (2007) avançam nessa direção ao mostrar que o custeio baseado no tempo oferece uma forma mais parcimoniosa de modelar processos, conectando custo à duração efetiva das atividades e à heterogeneidade das transações.

No campo florestal, essa inflexão é especialmente relevante. Nurminen et al. (2009) demonstram que, em operações de colheita *cut to length* e transporte rodoviário, o custo não

deriva apenas do volume movimentado, mas da composição dos sortimentos, da necessidade de cargas mistas, da distância entre pontos de estocagem e da frequência de operações auxiliares. O estudo mostra que o incremento de sortimentos pode melhorar a aderência ao mercado, mas também ampliar tempos de separação, carregamento e coleta multiponto, elevando o custo unitário. Ackerman et al. (2014), ao propor um modelo padronizado de custos de operações florestais, reforçam a necessidade de decompor atividades, máquinas e tempos operacionais para produzir medidas economicamente úteis.

Essa leitura aproxima a gestão de custos da gestão estratégica. Em vez de tratar custo como variável isolada, a abordagem estratégica o vincula à cadeia de valor, aos direcionadores de estrutura e às escolhas de coordenação. Shank & Govindarajan (1993) formulam esse ponto ao ligar informação contábil a estratégia competitiva. Na literatura florestal, Nuutinen et al. (2004) mostram que a análise da cadeia de valor permite reconsiderar decisões de compra e venda de madeira sob uma ótica sistêmica, deslocando o centro da análise da unidade isolada para os encadeamentos entre atividades. Assim, o custo economicamente relevante é o custo que advém de relações entre colheita, transporte, estocagem, contratação e atendimento industrial.

A literatura logística converge com esse argumento. Ballou (1985) já tratava o custo total como resultado de trade offs entre transporte, estoque, serviço e coordenação. Christopher & Gattorna (2005) atualizam essa tradição ao defender uma gestão do custo da cadeia de suprimentos orientada por valor. Em contextos florestais, essa perspectiva implica reconhecer que decisões aparentemente locais, como aumentar o número de pontos de coleta ou reduzir estoques de segurança, podem reduzir um item contábil e, ao mesmo tempo, elevar a vulnerabilidade global do sistema.

2.2 LOGÍSTICA COMO DIMENSÃO ESTRATÉGICA DA PRODUÇÃO FLORESTAL

A logística florestal não é mera função de apoio. Ela organiza a conexão entre talhões, estradas florestais, pátios, terminais, operadores de transporte e plantas industriais. Em setores de base florestal, essa malha assume caráter estratégico porque a matéria-prima é volumosa, dispersa, sensível ao tempo e dependente de infraestrutura específica. Väättäinen et al. (2020) mostram que a logística de madeira roliça e biomassa envolve múltiplas operações, modais e locais de armazenamento, em ambiente altamente variável ao longo do ano. O efeito prático é

que a eficiência depende tanto de capacidade de movimentação quanto de capacidade de absorver sazonalidade, umidade, restrições de peso, condições de estrada e eventos extremos.

As revisões de Audy et al. (2022) e Malladi & Sowlati (2017) confirmam que o transporte de madeira configura um problema de roteirização distinto dos modelos logísticos genéricos. A produção florestal lida com múltiplos pontos de origem, restrições de acesso, janelas sazonais, cargas heterogêneas e forte acoplamento entre colheita e entrega. Por isso, a otimização logística não se reduz à menor distância. Ela envolve sincronização de frota, escolha de rotas, gestão de filas, uso de terminais e capacidade de reprogramação diante de perturbações (Przybyczewski & Stroparo, 2021)

Estudos aplicados reforçam o caráter estruturante da logística. Keramati et al. (2020) mostram que políticas de manutenção de estradas alteram simultaneamente custo de transporte, roteirização e emissões, revelando um campo clássico de trade off. Neste sentido, Sarrazin et al. (2019) demonstram que a implantação de centros logísticos pode elevar a rentabilidade do sistema ao reduzir erros de sorting e custos de transporte. Por outro lado, Sjölling et al. (2023) indicam que cenários de mitigação de risco no transporte ferroviário podem reduzir exposição a perturbações com aumento marginal de custo sistêmico. Já Dogru et al. (2024) ao examinar a indústria madeireira dos Estados Unidos, classificam vinte e cinco desafios logísticos interdependentes e mostram que produtividade e lucratividade são corroídas por problemas que atravessam a cadeia, a firma e o ambiente institucional.

O ponto decisivo é que a logística estrutura o próprio espaço de possibilidade econômica. Quando as condições de estrada pioram, quando a fila no recebimento cresce ou quando o mix de sortimentos obriga coleta multiponto, não ocorre apenas um aumento de despesa. O sistema perde fluidez, consome capacidade, alonga tempos de ciclo e aumenta a exposição a novas falhas. A economia da produção florestal é, portanto, uma economia de fluxos.

2.3 RISCO COMO CATEGORIA ANALÍTICA

A literatura sobre risco oferece a base conceitual para compreender por que a eficiência econômica não pode ser tratada como simples reflexo de custos observados. Na tradição knightiana, retomada por Watkins & Knight (1922) e discutida por Taylor (2003), risco se refere a situações nas quais a variabilidade pode ser ao menos parcialmente antecipada, enquanto

incerteza designa estados em que probabilidades, consequências ou ambas permanecem mal definidas.

Tratando especificamente de planejamento florestal, Kangas & Kangas (2004) e Peraldos-Tato et al. (2013) mostram que essa distinção não é meramente filosófica. Ela determina quais instrumentos são viáveis, desde análise probabilística e otimização até abordagens baseadas em cenários e suporte multicritério.

Na produção florestal, o risco assume natureza multidimensional. A revisão de Auer & Rauch (2021) mostra que riscos de suprimento madeireiro incluem perturbações naturais, falhas operacionais, incerteza de mercado, mudanças regulatórias e limitações logísticas. Wang et al. (2023) organizam esses riscos em tipologias setoriais e destacam que a literatura ainda carece de modelos integrados para o setor florestal. Roos (2023) evidencia que danos florestais produzem choques simultâneos de volume, qualidade, urgência de remoção e saturação logística, o que reforça o caráter sistêmico da exposição ao risco.

No plano operacional, o risco aparece em falhas mecânicas, acidentes, indisponibilidade de mão de obra e defeitos de infraestrutura. Pesquisa de Conrad (2019) mostra que acidentes no transporte de madeira afetam diretamente a eficiência do abastecimento e se associam a condições de frota, manutenção e contexto viário e Kováč et al., (2020) utilizam FMEA para priorizar falhas em harvesters e mostram que criticidade deriva da combinação entre ocorrência, severidade e detectabilidade, com ênfase explícita na perda de lucro associada ao tempo de máquina parada. Esse ponto é importante para a abordagem aqui proposta, porque traduz risco técnico em consequência econômica e logística.

Há ainda riscos econômicos e contratuais como os discutidos por Alonso-Ayuso et al. (2017) que mostram que demanda e preços futuros alteram decisões de corte e construção de acessos, e que modelos estocásticos com medidas de risco superam soluções determinísticas. Rahimi et al. (2020) evidenciam que a seleção de contratos de suprimento sob incerteza reduz custo total quando incorpora cenários de volume, preço e falha contratual.

Numa abordagem mais ampla da gestão da cadeia de suprimentos, Zsidisin & Ellramm (2003) mostram que o gerenciamento do risco de suprimento depende de mecanismos de governança capazes de reduzir a probabilidade de eventos adversos enquanto Hendricks & Singhal (2005) demonstram que disrupções na cadeia geram efeitos persistentes sobre desempenho e risco da firma, o que reforça a tese de que risco não é custo extraordinário residual, mas variável estruturante da performance.

2.4 INTEGRAÇÃO ENTRE RISCO CUSTO E LOGÍSTICA

A integração entre essas três dimensões decorre de uma relação causal simples, mas frequentemente negligenciada. O risco altera a fluidez logística. A alteração da fluidez logística modifica o consumo de capacidade, de tempo e de ativos. Esse novo consumo redefine o custo econômico efetivo do sistema. Em outras palavras, o risco torna-se custo por meio da logística.

A literatura já oferece peças importantes dessa integração. Nurminen et al. (2009) mostram que a fragmentação de sortimentos eleva o custo por meio de mecanismos logísticos concretos, como sorting adicional e coleta multiponto. Väättäinen et al., (2020) evidenciam que sazonalidade, umidade, terminais e modais alternativos funcionam simultaneamente como variáveis logísticas e instrumentos de mitigação de risco. Amrouss et al. (2017) mostram que a gestão em tempo real de disrupções no transporte florestal precisa integrar reprogramação operacional e impacto econômico e pesquisa de Murat et al. (2024) revelam que vulnerabilidades econômicas, ambientais, sociais e operacionais interagem e que a conveniência da estrutura da cadeia ocupa posição central nessas interdependências. Neste sentido, Mena-Reyes et al. (2025) demonstram, por sua vez, que uma rede logística aparentemente eficiente pode ampliar exposição a conflitos sociais, e que redes menos complexas podem reduzir vulnerabilidade sem grandes perdas econômicas.

O limite das abordagens fragmentadas está justamente em desmembrar o que, empiricamente, opera de forma conjunta. A gestão de custos isolada mede sem explicar. A logística isolada otimiza sem qualificar vulnerabilidades. A gestão de risco isolada classifica eventos sem rastrear sua tradução econômica. A proposta RCL busca superar essa cisão ao tratar risco, custo e logística como variáveis coprodutoras da eficiência econômica.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O estudo caracteriza-se como pesquisa teórica, qualitativa e exploratória, desenvolvida por meio de revisão integrativa da literatura internacional (Guerra et al., 2024). O corpus inicial foi constituído a partir da busca profunda concluída no projeto com o tema risco custo e logística na produção florestal, cuja cobertura estimada excedeu noventa e cinco por cento dos trabalhos relevantes identificados.

A busca recuperou 165 registros e organizou o material em frentes temáticas sobre risco e logística em cadeias florestais, custeio e gestão estratégica de custos, planejamento logístico, incerteza e métodos de avaliação de risco, resiliência, disrupções e governança contratual.

A base utilizada foi a base acadêmica internacional integrada ao ambiente de pesquisa do projeto, voltada à literatura científica indexada. A estratégia de revisão privilegiou trabalhos recentes diretamente vinculados à produção florestal, sem excluir obras clássicas necessárias para a construção do arcabouço analítico. Foram incluídos estudos teóricos, revisões, trabalhos metodológicos e aplicações empíricas sobre colheita, transporte, planejamento florestal, suprimento madeireiro, custeio por atividades, logística e risco. Foram excluídos estudos estritamente industriais sem vínculo analítico com a produção florestal, bem como trabalhos cujo foco ambiental ou tecnológico não permitia articulação com eficiência econômica.

A análise ocorreu em três movimentos. Primeiro, procedeu-se à leitura temática dos subcampos mais aderentes ao problema, com ênfase em revisões de risco logístico florestal (Audy et al., 2022; Auer & Rauch, 2021; Malladi & Sowlati, 2017; Roos, 2023) e em trabalhos sobre custeio e cadeia de valor (Ackerman et al., 2014; Kaplan & Anderson, 2007; Kaplan & Cooper, 1997; Nurminen et al., 2009; Nuutinen et al., 2004). Segundo, foram mobilizados estudos aplicados para qualificar tipologias de risco e suas implicações, como planejamento sob incerteza (Alonso-Ayuso et al., 2017; Rahimi et al., 2020), riscos operacionais e humanos (Joseph L. Conrad, 2019; Kováč et al., 2020), e vulnerabilidades sistêmicas (Mena-Reyes et al., 2025; Murat et al., 2024). Terceiro, realizou-se síntese interpretativa voltada à formulação da abordagem RCL e da matriz analítica apresentada na seção seguinte.

A principal limitação metodológica reside no fato de a revisão ser orientada por finalidade teórica e não por metanálise estatística. Além disso, a literatura disponível concentra-se fortemente em países do hemisfério norte e em problemas de abastecimento madeireiro, viés já apontado por Auer & Rauch (2021). Ainda assim, a recorrência dos mecanismos identificados confere robustez conceitual à síntese proposta.

4 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS DADOS

4.1 A LÓGICA INTEGRADA RCL

A abordagem RCL parte de uma redefinição da eficiência econômica. Em vez de entendê-la como minimização de custo observado, ela a compreende como capacidade de preservar resultado econômico sob condições de variabilidade operacional, espacial e institucional. Isso significa que um sistema eficiente não é apenas o que gasta menos em

condições normais, mas o que mantém fluidez, previsibilidade e adaptabilidade quando sujeito a perturbações.

Nessa chave, risco deixa de ser um fator externo e passa a ser condição constitutiva do desempenho. A logística, por sua vez, deixa de ser função de apoio e passa a ser o mecanismo por meio do qual a exposição ao risco se converte em custo adicional, perda de produtividade ou destruição de valor. O custo, finalmente, deixa de ser variável final de registro e passa a ser linguagem de tradução econômica das tensões do sistema produtivo.

A integração entre risco, logística e custo pode ser sintetizada a partir de um encadeamento analítico que explicita a função de cada dimensão na produção do resultado econômico. O Quadro 1 sistematiza essa articulação, evidenciando como cada componente contribui para a construção da eficiência sob condições de variabilidade.

Quadro 1 – Estrutura Analítica da Abordagem RCL (Risco–Custo–Logística)

Dimensão	Função analítica	Questão central	Efeito sobre a eficiência
Risco	Identificar exposições e vulnerabilidades	O que pode interromper, atrasar, encarecer ou desorganizar o fluxo produtivo	Define a variabilidade do sistema
Logística	Organizar fluxos, capacidades e conexões	Como a produção se move no espaço e no tempo diante dessa variabilidade	Converte vulnerabilidade em fluidez ou fricção
Custo	Traduzir economicamente o comportamento do sistema	Quanto a configuração operacional realmente consome em recursos e capacidade	Expressa monetariamente a qualidade da coordenação
Integração RCL	Relacionar as três dimensões em um mesmo quadro	Como riscos, fluxos e consumo de recursos coproduzem o resultado econômico	Explica a eficiência como arquitetura sistêmica

Fonte: Elaborado pelas autoras, (2026)

A sistematização apresentada evidencia que a eficiência econômica não advém de forma isolada em nenhuma das dimensões analisadas. O risco define a variabilidade do sistema, a logística determina a capacidade de absorver ou amplificar essa variabilidade, e o custo traduz economicamente o resultado dessa interação. Assim, a eficiência deve ser compreendida como resultado da qualidade da coordenação entre essas três dimensões, e não como simples minimização de gastos observados.

A utilidade teórica dessa integração pode ser observada em três mecanismos recorrentes.



O primeiro é a complexidade de sortimentos. Em pesquisa de Nurminen et al., (2009), maior customização do produto gera ganhos mercadológicos potenciais, mas também amplia sorting, carga mista e coleta multiponto, elevando o custo logístico. O segundo é a sazonalidade logística. Em Väätäinen et al. (2020), degelo, umidade e restrições viárias exigem buffers, terminais e flexibilidade modal, de modo que o custo adicional não é anomalia, mas preço da resiliência. O terceiro é a perturbação disruptiva. Em Roos (2023) e Rauch et al. (2024), tempestades e madeira de salvamento saturam recepção industrial e reduzem capacidade efetiva de transporte, transformando risco ambiental em congestionamento, espera e perda de valor da madeira.

A abordagem RCL também permite reinterpretar a noção de inteligência de custos. Sob essa ótica, inteligência de custos não significa apenas detalhar centros de custo, mas converter sinais operacionais dispersos em visibilidade econômica acionável. Kaplan & Anderson (2007) oferecem a infraestrutura conceitual ao conectar custo a tempo e capacidade enquanto que Nurminen et al. (2009) mostram que esse vínculo pode ser operacionalizado em atividades florestais específicas. Santos et al. (2014) reforçam que a gestão de custos logísticos requer evidenciar trade offs e não apenas somar despesas. Assim, a inteligência de custos adequada à produção florestal é aquela capaz de antecipar como alterações em fila, rota, disponibilidade de estrada, mix de sortimentos, confiabilidade mecânica ou contrato de suprimento repercutirão sobre o custo total do sistema (Stroparo et al., 2024).

4.2 SISTEMATIZAÇÃO DAS CATEGORIAS DE RISCO

A literatura revisada permite consolidar seis categorias analíticas de risco especialmente relevantes para a produção florestal. A primeira é o risco operacional, associado a falhas de máquina, indisponibilidade de equipamentos, perda de produtividade e instabilidade da execução. A segunda é o risco logístico, ligado a estradas, roteirização, capacidade de transporte, terminais, filas e sincronização da cadeia. A terceira é o risco econômico, expresso em flutuações de preço, demanda, custos de insumos e retorno esperado dos planos de corte. A quarta é o risco ambiental, que inclui incêndios, tempestades, pragas, degelo e perda de trafegabilidade. A quinta é o risco contratual, relativo a falhas de fornecimento, terceirização, assimetria informacional e desenho de contratos. A sexta é o risco humano e sociotécnico, que abrange acidentes, manutenção, qualificação da força de trabalho, ergonomia, software embarcado e conflitos sociais.

Essas categorias não são estanques. Em Murat et al. (2024), por exemplo, a disponibilidade de recursos é o fator mais sensível às demais vulnerabilidades, enquanto a estrutura da cadeia aparece como elemento central das interações. Já em Mena-Reyes et al. (2025), a exposição a conflito social depende do desenho das conexões logísticas. Em Conrad (2019) e Kováč et al. (2020), segurança e confiabilidade técnica afetam simultaneamente disponibilidade operacional e desempenho logístico. Por outro lado, em Rahimi et al. (2020) e Palander (2022), contratos inadequados propagam risco para custo e continuidade do abastecimento. O valor analítico da tipologia está, portanto, menos na separação rígida dos riscos e mais na capacidade de torná-los comparáveis sob um mesmo esquema decisório.

4.3 MATRIZ ANALÍTICA RCL

O Quadro 2 apresenta a matriz analítica proposta. Trata-se de uma matriz qualitativa, construída a partir da síntese da literatura, para apoiar avaliação gerencial e pesquisas empíricas futuras. A probabilidade de ocorrência, os impactos e a criticidade devem ser entendidos como padrões típicos de exposição em sistemas de produção florestal, e não como parâmetros universais.

A partir da tipologia de riscos e da lógica integrada RCL, propõe-se a Matriz Analítica de Criticidade RCL (Risco–Custo–Logística), apresentada no Quadro 2. A matriz tem como finalidade organizar, de forma comparável, os diferentes tipos de risco segundo sua probabilidade de ocorrência e seus impactos econômico e logístico, permitindo avaliar sua criticidade sistêmica no contexto da produção florestal.

Quadro 2 – Matriz Analítica de Criticidade RCL na Produção Florestal

Tipo de risco	Probabilidade de ocorrência	Impacto econômico	Impacto logístico	Nível de criticidade
Operacional (Kováč et al., 2020; Lejeune & Kettunen, 2017)	Alta	Alto	Alto	Muito alta
Logístico (Audy et al., 2022; Dogru et al., 2024; Keramati et al., 2020)	Alta	Alto	Muito alto	Muito alta
Econômico (Alonso-Ayuso et al., 2017; Rahimi et al., 2020)	Média	Muito alto	Médio	Alta
Ambiental (Roos, 2023; Väättäinen et al., 2020)	Média	Muito alto	Muito alto	Muito alta
Contratual (Palander, 2022; Zsidisin & Ellram, 2003)	Média	Alto	Médio	Alta

Humano e sociotécnico (Joseph L. Conrad, 2019; Mena-Reyes et al., 2025)	Média a alta	Alto	Alto	Alta
---	--------------	------	------	------

Fonte: Elaborado pelas autoras a partir de Kováč et al. (2020), Audy et al. (2022), Roos (2023), Väättäinen et al. (2020), Rahimi et al. (2020), Zsidisin e Ellram (2003), entre outros.

A interpretação da matriz confirma o argumento central do artigo. Riscos operacionais e logísticos apresentam criticidade muito alta porque sua incidência costuma ser recorrente e sua capacidade de interromper fluxos é imediata. Uma falha de colheita, uma restrição viária ou uma fila persistente de descarga não apenas elevam custos unitários, mas desorganizam a cadência do sistema. Riscos ambientais também alcançam criticidade muito alta, embora com frequência relativa menor, porque alteram oferta, trafegabilidade, qualidade da madeira e urgência de resposta em várias frentes ao mesmo tempo. (Roos, 2023; Väättäinen et al., 2020).

Riscos econômicos e contratuais aparecem com probabilidade média, mas com forte efeito monetário. Em Alonso-Ayuso et al. (2017), a incorporação explícita do risco melhora decisões de corte e abertura de acessos. Para Rahimi et al. (2020), a seleção estocástica de contratos reduz custo de suprimento frente a choques de volume e preço. Esses resultados sugerem que o risco econômico não se manifesta apenas como volatilidade externa. Ele reconfigura decisões físicas de colheita e logística. O mesmo vale para o risco contratual, cujo desenho influencia flexibilidade, compromisso de volume e capacidade de resposta do sistema (Palander, 2022; Zsidisin & Ellram, 2003).

O risco humano e sociotécnico, por fim, merece posição específica na abordagem RCL. A literatura tradicional tende a diluí-lo em segurança ou manutenção. No entanto, evidências recentes mostram que ele atua como mediador importante entre confiabilidade técnica e fluidez operacional. Conrad (2019) associa acidentes à condição da frota e a fatores de contexto viário. Kováč et al. (2020) demonstram que a prioridade de intervenção deve considerar ocorrência, severidade e detectabilidade. Mena-Reyes et al. (2025) ampliam essa discussão ao mostrar que vulnerabilidade social também pode ser lida como risco logístico territorializado.

4.4 INTERDEPENDÊNCIAS ENTRE RISCO CUSTO E LOGÍSTICA

A principal força explicativa da abordagem RCL está na análise das interdependências. O primeiro encadeamento relevante é risco para logística. Condições climáticas adversas, danos florestais, falhas de máquina, conflitos territoriais e quebra contratual reordenam rotas, janelas e estoques, exigindo buffers, terminais, redundâncias e reprogramações (Mena-Reyes et al., 2025; Roos, 2023; Väättäinen et al., 2020).



O segundo encadeamento é logístico para custo nos quesitos de aumento de distância efetiva, espera, carga parcial, coleta multiponto, ociosidade e reposicionamento de frota consomem tempo e capacidade, elevando custo real por unidade entregue (Keramati et al., 2020; Nurminen et al., 2009; Sarrazin et al., 2019).

O terceiro encadeamento é custo para decisão. Quando esses efeitos são visíveis, torna-se possível comparar alternativas de rede, políticas de estoque, arranjos contratuais e critérios de manutenção com maior consistência estratégica (Kaplan & Anderson, 2007; Rahimi et al., 2020; Sjölling et al., 2023; (Przybyczewski & Stroparo, 2021)

Esse ponto permite superar a oposição simplista entre eficiência e resiliência. A literatura sugere que alguma redundância logística pode reduzir custo esperado ao longo do tempo, mesmo que eleve gasto direto no curto prazo. O caso dos terminais analisado em Väättäinen et al. (2020) mostra que buffers podem sustentar abastecimento em períodos de baixa trafegabilidade.

O estudo de Sjölling et al. (2023) indica que medidas de mitigação em transporte ferroviário podem reduzir risco com aumento de custo inferior a um por cento.

Sarrazin et al. (2019) mostram que centros logísticos podem aumentar lucro ao melhorar sorting e coordenação. Portanto, a eficiência econômica não deve ser definida como ausência de folga, mas como escolha ótima entre fluidez, proteção e custo total.

Também se torna claro que a fragmentação analítica produz decisões míopes. Se o gestor observa apenas o custo de transporte por quilômetro, pode desprezar a vantagem de terminais, contratos flexíveis ou manutenção preventiva. Se observa apenas o risco, pode superdimensionar redundâncias sem medir seu retorno econômico. Se observa apenas a logística, pode otimizar rotas em condições normais e perder robustez diante de perturbações. A integração RCL fornece justamente a mediação entre essas visões parciais.

4.5 CENÁRIOS ILUSTRATIVOS PARA DECISÃO

A utilidade da abordagem RCL pode ser mais bem compreendida por meio de cenários analíticos que ilustram como diferentes tipos de risco se traduzem em reconfigurações logísticas e implicações econômicas. O Quadro 3 apresenta situações recorrentes na literatura e seus respectivos encadeamentos.

Quadro 3 – Cenários Analíticos de Decisão sob a Perspectiva RCL

Cenário	Efeito dominante do risco	Tradução logística	Implicação econômica
Alta do diesel	Pressão sobre custo variável e margem	Reconfiguração de rotas, modais e consolidação de cargas	Ganham valor contratos, terminais e planejamento de capacidade (Christopher & Gattorna, 2005; Väättäinen et al., 2020)
Restrição de trafegabilidade em estradas	Aumento da incerteza operacional	Menor acesso, desvios, estoques preventivos e janelas mais estreitas	Cresce o custo esperado de atraso e de capacidade ociosa (Gomes et al., 2021; Keramati et al., 2020)
Evento de madeira de salvamento	Choque ambiental com urgência de remoção	Saturação de recepção, filas, necessidade de armazenagem e cooperação ampliada	Perdas de valor e capacidade exigem soluções resilientes (Rauch et al., 2024; Roos, 2023)
Instabilidade contratual de suprimento	Risco de volume e cumprimento	Maior variabilidade no abastecimento e necessidade de recourse	Contratos flexíveis podem reduzir custo total esperado (Rahimi et al., 2020; Zsidisin & Ellram, 2003)

Fonte: Elaborado pelas autoras com base em Christopher e Gattorna (2005), Väättäinen et al. (2020), Keramati et al. (2020), Roos (2023), Rahimi et al. (2020) e Zsidisin e Ellram (2003).

Os cenários apresentados demonstram que a racionalidade econômica na produção florestal não pode ser baseada em reações *ex post* aos custos observados. Ao contrário, decisões eficientes são aquelas capazes de antecipar como a exposição ao risco exigirá determinadas configurações logísticas e, conseqüentemente, diferentes estruturas de custo. Nesse sentido, a abordagem RCL contribui para deslocar a análise da mensuração de gastos para a avaliação de

Esses cenários mostram que a decisão economicamente racional não é a que reage ao custo depois do evento, mas a que antecipa como a exposição ao risco exigirá determinada configuração logística. A inteligência de custos, nesse contexto, funciona como capacidade de comparar arquiteturas operacionais e não apenas despesas observadas.

Para a gestão de custos, a implicação central é a necessidade de substituir métricas médias por modelos sensíveis a atividade, tempo e capacidade. O setor florestal demanda sistemas aptos a distinguir custo de execução normal, custo de variabilidade e custo de disrupção. O ABC e o TDABC oferecem base conceitual para isso Kaplan & Anderson (2007); Kaplan & Cooper (1997), e a aplicação de Nurminen et al. (2009) mostra que tal adaptação é viável no ambiente florestal.

Para a logística, a implicação é que desempenho não pode ser reduzido a distância ou

frete unitário. A estrutura da rede, a qualidade da informação, a possibilidade de colaboração e a capacidade de reprogramação são ativos econômicos. Estudos sobre colaboração e benchmarking em cadeias de transporte de madeira indicam ganhos com mutualização e coordenação François & Bourrières (2021), enquanto análises de centros logísticos e redes complexas mostram que simplificação e consolidação podem gerar valor Dogru et al. (2024); Sarrazin et al. (2019).

Para a tomada de decisão, a contribuição da abordagem RCL está em oferecer uma gramática comum entre áreas que usualmente operam com linguagens distintas. A contabilidade passa a ler risco e logística como determinantes do custo. A logística passa a incorporar criticidade e valor esperado das perturbações. A gestão de risco passa a traduzir vulnerabilidade em impacto econômico e desenho de rede. Essa convergência é condição para decisões mais conscientes sobre abertura de estradas, seleção de contratos, políticas de manutenção, uso de terminais, dimensionamento de frota e desenho da carteira de abastecimento.

5 CONCLUSÕES

O artigo sustentou que a eficiência econômica na produção florestal não pode ser explicada de modo satisfatório por abordagens centradas exclusivamente na mensuração de custos. A literatura analisada mostra que o desempenho advém da interação entre vulnerabilidades, fluxos logísticos e consumo de recursos. Com base nessa constatação, foi proposta a abordagem RCL, na qual risco, custo e logística são tratados como dimensões coprodutoras da eficiência econômica.

As principais contribuições teóricas do estudo podem ser sintetizadas em três pontos. Primeiro, o custo foi reposicionado como tradução monetária de uma arquitetura operacional e não como variável autônoma. Segundo a logística foi interpretada como mecanismo estruturante da eficiência, pois é por meio dela que variabilidade e perturbações se convertem em fluidez ou fricção econômica. Terceiro, o risco foi elevado à condição de categoria central da análise, uma vez que sua incidência redefine simultaneamente planejamento, capacidade, contratos e custo total.

A matriz analítica proposta constitui o núcleo operacional dessa contribuição. Ao classificar riscos segundo probabilidade de ocorrência, impacto econômico, impacto logístico e criticidade, ela oferece um dispositivo conceitual para avaliações comparativas, desenho de indicadores e futuras aplicações empíricas. Sua utilidade está menos em produzir respostas

fechadas e mais em organizar o olhar analítico sobre sistemas produtivos complexos.

As limitações do estudo decorrem de seu caráter teórico e da dependência de uma literatura predominantemente concentrada em certos contextos geográficos e cadeias específicas de suprimento. Pesquisas futuras podem avançar em três direções. A primeira é a validação empírica da matriz RCL em empresas de colheita, transporte e abastecimento industrial. A segunda é o desenvolvimento de métricas integradas de inteligência de custos que capturem tempo, capacidade e exposição ao risco em nível operacional. A terceira é a modelagem de cenários comparativos para avaliar como diferentes arquiteturas logísticas respondem a choques de preço, clima, infraestrutura, contrato e conflito territorial. Nessas frentes, a abordagem RCL pode servir como base para uma agenda de pesquisa capaz de aproximar análise econômica, logística e gestão do risco na produção florestal.

REFERÊNCIAS

- Ackerman, P., Belbo, H., Eliasson, L., Jong, A. de, Lazdiņš, A., & Lyons, J. (2014). The COST model for calculation of forest operations costs. In *International Journal of Forest Engineering* (Vol. 25, pp. 75–81). <https://doi.org/10.1080/14942119.2014.903711>
- Alonso-Ayuso, A., Escudero, L., Guignard, M., & Weintraub, A. (2017). Risk management for forestry planning under uncertainty in demand and prices. *Eur. J. Oper. Res.*, 267, 1051–1074. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.12.022>
- Amrouss, A., Hachemi, N., Gendreau, M., & Gendron, B. (2017). Real-time management of transportation disruptions in forestry. *Comput. Oper. Res.*, 83, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.02.008>
- Audy, J., Rönnqvist, M., D'Amours, S., & Yahiaoui, A.-E. (2022). Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review. *International Journal of Forest Engineering*, 34, 143–167. <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2142367>
- Auer, V., & Rauch, P. (2021). Wood supply chain risks and risk mitigation strategies: A systematic review focusing on the Northern hemisphere. *Biomass & Bioenergy*, 148, 106001. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2021.106001>
- Ballou, R. (1985). *Business Logistics Management: Planning and Control*.
- Christopher, M., & Gattorna, J. (2005). SUPPLY CHAIN COST MANAGEMENT AND VALUE-BASED PRICING. In *Industrial Marketing Management* (Vol. 34, pp. 115–121). <https://doi.org/10.1016/J.INDMARMAN.2004.07.016>
- Dogru, A. K., Elmadağ, A. B., Gong, K., Travers, J. M., & Meng, C. (2024). Examination of upstream supply chain and logistics issues in the US logging industry. *Transportation Journal*. <https://doi.org/10.1002/tjo3.12009>



- François, J., & Bourrières, J. (2021). Benchmarking collaborative timber supply chains. In *Scandinavian Journal of Forest Research* (Vol. 36, pp. 315–323). <https://doi.org/10.1080/02827581.2021.1925337>
- Gomes, V., Monti, C. A. U., Silva, C. S. J. e, & Gomide, L. R. (2021). Operational harvest planning under forest road maintenance uncertainty. In *Forest Policy and Economics* (Vol. 131, p. 102562). <https://doi.org/10.1016/J.FORPOL.2021.102562>
- Hendricks, K. B., & Singhal, V. (2005). An Empirical Analysis of the Effect of Supply Chain Disruptions on Long-Run Stock Price Performance and Equity Risk of the Firm. *Production and Operations Management*, 14, 35–52. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2005.tb00008.x>
- Joseph L. Conrad, I. (2019). Analysis of timber transportation accident frequency, location, and contributing factors in Georgia, USA 2006-2016. In *International Journal of Forest Engineering* (Vol. 30, pp. 109–120). <https://doi.org/10.1080/14942119.2018.1553450>
- Kangas, A., & Kangas, J. (2004). Probability, possibility and evidence: approaches to consider risk and uncertainty in forestry decision analysis. *Forest Policy and Economics*, 6, 169–188. [https://doi.org/10.1016/S1389-9341\(02\)00083-7](https://doi.org/10.1016/S1389-9341(02)00083-7)
- Kaplan, R., & Anderson, S. (2007). The innovation of time-driven activity-based costing. In *Journal of cost management* (Vol. 21, pp. 5–15).
- Kaplan, R., & Cooper, R. (1997). *Cost & Effect: Using Integrated Cost Systems to Drive Profitability and Performance*. <https://doi.org/10.5860/choice.35-5748>
- Keramati, A., Lu, P., Sobhani, A., & Esmaeili, S. A. H. (2020). *Impact of Forest Road Maintenance Policies on Log Transportation Cost, Routing, and Carbon-Emission Trade-Offs: Oregon Case Study* (Vol. 146, p. 04020028). <https://doi.org/10.1061/jtepbs.0000335>
- Kováč, J., Ťavoda, P., Krilek, J., & Harvánek, P. (2020). FMEA method in operational reliability of forest harvesters. In *Open Engineering* (Vol. 11, pp. 29–38). <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0003>
- Lejeune, M., & Kettunen, J. (2017). Managing Reliability and Stability Risks in Forest Harvesting. *Manuf. Serv. Oper. Manag.*, 19, 620–638. <https://doi.org/10.1287/msom.2017.0626>
- Malladi, K. T., & Sowlati, T. (2017). Optimization of operational level transportation planning in forestry: a review. *International Journal of Forest Engineering*, 28, 198–210. <https://doi.org/10.1080/14942119.2017.1362825>
- Mena-Reyes, J. F., Soto-Concha, R., Vergara, F. P., Ortíz-Araya, V., Escobar, J. W., & Linfati, R. (2025). Integrating Social Conflicts into Sustainable Decision-Making of the Forest-to-Lumber Supply Chain. *Forests*. <https://doi.org/10.3390/f16111644>
- Murat, M., Ayyıldız, E., & Asan, U. (2024). Evaluating the vulnerability of forestry supply chains through fuzzy cognitive map. *European Journal of Forest Engineering*. <https://doi.org/10.33904/ejfe.1517968>

Nurminen, T., Korpunen, H., & Uusitalo, J. (2009). Applying the activity-based costing to cut-to-length timber harvesting and trucking. In *Silva Fennica* (Vol. 43, pp. 847–870). <https://doi.org/10.14214/SF.177>

Nuutinen, T., Moberg, L., Verkasalo, E., & Peltola, H. (2004). *Value-chain analysis for forest management timber purchasing and timber sale decisions*.

Palander, T. (2022). Outsourcing Issues of Wood Supply Chain Management in the Forest Industry. *Forest Science*, 68, 521–532. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxac029>

Pasalodos-Tato, M., Mäkinen, A., Garcia-Gonzalo, J., Borges, J., Lämås, T., & Eriksson, L. (2013). Review. Assessing uncertainty and risk in forest planning and decision support systems: review of classical methods and introduction of new approaches. *Forest Systems*, 22, 282–303. <https://doi.org/10.5424/FS/2013222-03063>

Rahimi, A., Rönnqvist, M., Lebel, L., & Audy, J. (2020). Selecting wood supply contracts under uncertainty using stochastic programming. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 59, 191–211. <https://doi.org/10.1080/03155986.2020.1800975>

Rauch, P., Kogler, C., & Beiglböck, A. (2024). Empirical Insights into Salvage Wood Logistics. *Croatian Journal of Forest Engineering*. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2272>

Roos, A. (2023). Forest damage and forest supply chains: a literature review and reflections. *International Journal of Forest Engineering*, 34, 330–339. <https://doi.org/10.1080/14942119.2023.2240607>

Santos, T. F. dos, Gonçalves, A. T. P., & Leite, M. S. A. (2014). Logistics cost management: insights on tools and operations. In *International Journal of Logistics Systems and Management* (Vol. 23, p. 329). <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2014.065500>

Sarrazin, F., Lebel, L., & Lehoux, N. (2019). Analyzing the impact of implementing a logistics center for a complex forest network. *Canadian Journal of Forest Research*. <https://doi.org/10.1139/CJFR-2018-0346>

Shank, J. K., & Govindarajan, V. (1993). *Strategic Cost Management: The New Tool for Competitive Advantage*.

Sjölling, I., Rönnqvist, E., & Fjeld, D. (2023). Rail transport in Swedish wood supply – seasonal variation, system risks and mitigation costs. In *International Journal of Forest Engineering* (Vol. 34, pp. 294–302). <https://doi.org/10.1080/14942119.2023.2167379>

Taylor, R. (2003). The role of risk versus the role of uncertainty in economic systems. In *Agricultural Systems* (Vol. 75, pp. 251–264). [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00068-9](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00068-9)

Väätäinen, K., Anttila, P., Eliasson, L., Enström, J., Laitila, J., Prinz, R., & Routa, J. (2020). Roundwood and Biomass Logistics in Finland and Sweden. *Croatian Journal of Forest Engineering*. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.803>

Wang, M., Radics, R., Islam, S., & Hwang, K.-S. (2023). Towards Forest Supply Chain Risks. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*. <https://doi.org/10.31387/oscm0520375>



Watkins, G., & Knight, F. H. (1922). Knight's Risk, Uncertainty and Profit. In *Quarterly Journal of Economics* (Vol. 36, pp. 682–690). <https://doi.org/10.2307/1884757>

Zsidisin, G., & Ellram, L. (2003). An Agency Theory Investigation of Supply Risk Management. In *Journal of Supply Chain Management* (Vol. 39, pp. 15–27). <https://doi.org/10.1111/J.1745-493X.2003.TB00156.X>