

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
CAMPUS DIADEMA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ARBORIZAÇÃO URBANA

Edimar Alves Gonçalves

Fernando Mora Gaspari

Lucas Kevin de Andrade Cruz

Thayna da Silva Santana

**MODELO COMPUTACIONAL DETERMINÍSTICO PARA AVALIAÇÃO
DE RISCO DE QUEDA DE ÁRVORES URBANAS**

Diadema

2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
CAMPUS DIADEMA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ARBORIZAÇÃO URBANA

Edimar Alves Gonçalves

Fernando Mora Gaspari

Lucas Kevin de Andrade Cruz

Thayna da Silva Santana

**MODELO COMPUTACIONAL DETERMINÍSTICO PARA AVALIAÇÃO
DE RISCO DE QUEDA DE ÁRVORES URBANAS**

Trabalho apresentado à Universidade Federal de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Arborização Urbana.

Orientadora: Prof.^a Dra. Aline A. Cavalari Colete

Diadema

2026

RESUMO

Avaliar o risco de queda de árvores na cidade é uma tarefa que precisa conciliar critério técnico e praticidade no campo. Este trabalho descreve uma ferramenta determinística de cálculo de risco, feita como aplicação web de arquivo único, que aplica a Avaliação Visual de Árvores (VTA) dentro da estrutura matricial do ISA Tree Risk Assessment Qualification (TRAQ). O cálculo separa o risco em três componentes avaliados isoladamente: a probabilidade de falha estrutural, calculada por parte da árvore (copa, tronco e raízes); a probabilidade de o alvo ser atingido; e a consequência da falha. Esses componentes são cruzados em duas matrizes, que levam a uma categoria final de risco (Baixo, Médio, Alto ou Extremo). Para confirmar que o cálculo se comporta como projetado, dez casos de calibração — elaborados pelos próprios autores a partir de cenários da arborização urbana de São Paulo — foram executados em um harness automatizado, com aprovação em todos eles (10/10); trata-se de verificação de consistência interna do modelo, não de validação contra casos reais de campo ou contra o julgamento de avaliadores independentes. O determinismo garante reprodutibilidade computacional — a mesma entrada sempre produz a mesma saída —, mas não elimina a subjetividade da entrada em si, que permanece uma codificação visual do avaliador em campo. A ferramenta inclui ainda um módulo exploratório, ainda em fase de prova de conceito, que usa um modelo de visão computacional (GPT-5 mini, da OpenAI) para sugerir o preenchimento de campos a partir de fotos. O sistema, desenvolvido pelos próprios autores, está em operação piloto e busca aderência conceitual à Lei Municipal 17.794/2022 de São Paulo, sem substituir a avaliação presencial de profissional habilitado.

Palavras-chave: avaliação de risco arbóreo; VTA; TRAQ; arboricultura urbana; modelo determinístico; visão computacional; árvores urbanas; gestão de risco.

ABSTRACT

Assessing the risk of urban tree failure is a task that must reconcile technical rigor with practicality in the field. This work describes a deterministic tree-risk calculation tool, built as a single-file web application, which applies Visual Tree Assessment (VTA) within the matrix structure of the ISA Tree Risk Assessment Qualification (TRAQ). The calculation separates risk into three independently assessed components: the probability of structural failure, computed per tree part (crown, trunk, and roots); the probability of the target being struck; and the consequence of failure. These components are combined through two matrices, yielding a final risk category (Low, Moderate, High, or Extreme). To confirm that the calculation behaves as designed, ten calibration cases — authored by the researchers themselves from urban forestry scenarios in São Paulo — were run through an automated harness, all of which passed (10/10); this constitutes internal consistency verification of the model, not validation against real field outcomes or independent assessors' judgment. Determinism guarantees computational reproducibility — the same input always yields the same output — but does not eliminate the subjectivity of the input itself, which remains a visual coding performed by the field assessor. The tool also includes an exploratory module, still at the proof-of-concept stage, that uses a computer-vision model (GPT-5 mini, OpenAI) to suggest field values from photographs. The system, developed by the authors themselves, is in pilot operation and seeks conceptual alignment with São Paulo Municipal Law No. 17,794/2022, without replacing the in-person assessment of a qualified professional.

Keywords: tree risk assessment; VTA; TRAQ; urban arboriculture; deterministic model; computer vision; urban trees; risk management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Fluxo geral do modelo de avaliação de risco arbóreo	10
Figura 2 — Matriz M1: probabilidade de falha × probabilidade de impacto	15
Figura 3 — Matriz M2: probabilidade combinada × consequência	15

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Grupos de entrada e respectivas variáveis	11
Tabela 2 — Fatores de sensibilidade ao contexto por parte	12
Tabela 3 — Modificador de contexto (M): condições e acréscimos	12
Tabela 4 — Função de classificação N(ponto)	13
Tabela 5 — Níveis de zona e ocupação do alvo	13
Tabela 6 — Termos do score de consequência	14
Tabela 7 — Faixas de consequência e pisos por parte	14
Tabela 8 — Ações de manejo e seus gatilhos	16
Tabela 9 — Defeitos da copa e galhos com pesos atribuídos	17
Tabela 10 — Defeitos do tronco com pesos atribuídos	18
Tabela 11 — Defeitos de raízes e colo com pesos atribuídos	19
Tabela 12 — Ajuste de peso pela razão t/R	19
Tabela 13 — Cobertura esperada do módulo de visão por tipo de campo	20
Tabela 14 — Resultados dos casos de calibração	23
Tabela 15 — Sensibilidade da categoria de risco à perturbação dos parâmetros	25
Tabela 16 — Mecanismo que decide o nível de falha da parte crítica	26

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Trabalhos relacionados	8
2	MATERIAIS E MÉTODOS	10
2.1	Estrutura conceitual do modelo	10
2.2	Entradas do modelo	11
2.3	Etapa 1 — Probabilidade de falha	11
2.4	Etapa 2 — Probabilidade de impacto	13
2.5	Etapa 4 — Consequência da falha	14
2.6	Etapas 3 e 5 — Matrizes de combinação	15
2.7	Etapas 6–7 — Recomendações de manejo e urgência	15
2.8	Catálogo de defeitos e pesos	16
2.9	Ajuste por razão t/R (parede residual)	19
2.10	Módulo de visão computacional	20
2.11	Implementação e verificação	20
3	RESULTADOS	23
3.1	Casos de calibração	23
3.2	Comportamento do modelo em casos extremos	24
3.3	Correção do double-counting	24
3.4	Análise de sensibilidade	25
3.5	Poder discriminante: fórmula versus pisos	25
4	DISCUSSÃO	27
4.1	Decisões de projeto e suas justificativas	27
4.2	Limitações conhecidas	27
4.3	Conformidade regulatória	28
4.4	Aplicações e extensibilidade	29
5	CONCLUSÃO	30
	REFERÊNCIAS	31
	APÊNDICE A — GUIA DE AVALIAÇÃO DE RISCO DE ÁRVORES	33

1. Introdução

Os benefícios da arborização urbana, sejam ambientais, paisagísticos ou de saúde pública, são conhecidos na literatura (Nowak & Dwyer, 2007; Mullaney et al., 2015). Por outro lado, árvores podem representar riscos ao apresentarem falhas estruturais, ferindo pessoas ou causando danos a veículos ou edificações. Em São Paulo, onde há milhares de árvores em vias públicas, a gestão de riscos é necessária e faz parte da rotina de gestores da cidade.

A Avaliação Visual de Árvores (VTA — *Visual Tree Assessment*), proposta por Mattheck e Breloer (1994), consolidou-se como método padrão de triagem em nível 1, baseado na identificação de sinais visuais de defeitos biomecânicos. A International Society of Arboriculture (ISA) sistematizou essa abordagem no programa TRAQ (*Tree Risk Assessment Qualification*), o qual combina matrizes qualitativas estruturadas a partir de três componentes independentes — probabilidade de falha, probabilidade de impacto e consequência — (Smiley et al., 2017; Dunster et al., 2017).

Embora bem fundamentadas, essas metodologias esbarram em dificuldades práticas. A avaliação em campo é, em boa medida, subjetiva, porque depende da experiência de quem avalia. Há também o risco de, ao combinar os três componentes, um mesmo fator contar em mais de um eixo, problema conhecido como *double-counting*. Some-se a isso a ausência, no processo de avaliação convencional, de um registro estruturado e auditável do cálculo, o que dificulta a reprodução e a auditoria das avaliações.

Diante disso, este trabalho apresenta uma ferramenta determinística que aplica a estrutura TRAQ em uma página web de arquivo único, reunindo três pontos principais. O primeiro é um cálculo em que cada fator entra em um único eixo, evitando o *double-counting*. O segundo é um conjunto de "pisos" que preservam a coerência biomecânica: uma falha de tronco ou de raiz, por exemplo, nunca é classificada como consequência apenas "Menor". O terceiro é o módulo experimental de visão computacional, o qual ajuda a preencher os campos de inspeção a partir de fotos dos exemplares arbóreos tiradas em campo.

Mais do que descrever a ferramenta, este trabalho investiga as decisões de projeto necessárias para operacionalizar a estrutura qualitativa do TRAQ em um modelo determinístico, preservando a coerência biomecânica dos resultados ao substituir o julgamento do avaliador por regras explícitas de cálculo.

1.1. Trabalhos relacionados

A avaliação de risco arbóreo dispõe de métodos consolidados que diferem sobretudo no grau de quantificação. O TRAQ, da ISA, é um sistema **qualitativo** ancorado na norma

ANSI A300: combina probabilidade de falha, probabilidade de impacto e consequência por meio de duas matrizes sequenciais, produzindo uma classificação final em quatro níveis (Baixo, Moderado, Alto, Extremo) (Smiley et al., 2017; Dunster et al., 2017). Em contraste, o **Quantified Tree Risk Assessment** (QTRA), proposto por Ellison no Reino Unido, adotou abordagem **quantitativa**: em sua formulação original, multiplicava valor do alvo, probabilidade de falha e potencial de impacto, expressando o resultado como uma probabilidade anual de dano significativo, avaliada contra um limiar de risco aceitável — tipicamente da ordem de 1 em 10.000 (Ellison, 2005).

A quantificação, contudo, não elimina a subjetividade da entrada. Em revisão do método, Stewart, O'Callaghan e Hartley (2013) observam que a análise de risco quantitativa clássica se apoia em modelagem física dos processos de falha e no reconhecimento explícito de incerteza e variabilidade — o que, segundo os autores, está ausente do QTRA, que dependeria mais de julgamentos subjetivos, sobretudo na estimativa da probabilidade de falha. A observação é decisiva: o limiar de 1 em 10.000, de aparência precisa, herda a subjetividade da entrada que o alimenta — precisão aparente que é justamente o alvo da crítica. No mesmo sentido, estudos de reprodutibilidade mostram que avaliações de risco arbóreo são inerentemente subjetivas e que o avaliador influencia o resultado tanto quanto o método empregado, com distribuições de classificação que divergem de forma relevante entre abordagens (Koeser et al., 2014; Klein et al., 2023).

Situa-se, neste ponto, a contribuição deste trabalho. Em vez de propor um novo esquema de pontuação, o trabalho operacionaliza a estrutura qualitativa do TRAQ como um conjunto de regras determinísticas e explícitas, de modo que a mesma entrada produza sempre a mesma classificação.

2. Materiais e Métodos

2.1. Estrutura conceitual do modelo

O modelo segue a estrutura matricial do TRAQ-ISA, decompondo o risco em três componentes avaliados de forma independente e combinados por duas matrizes sequenciais:

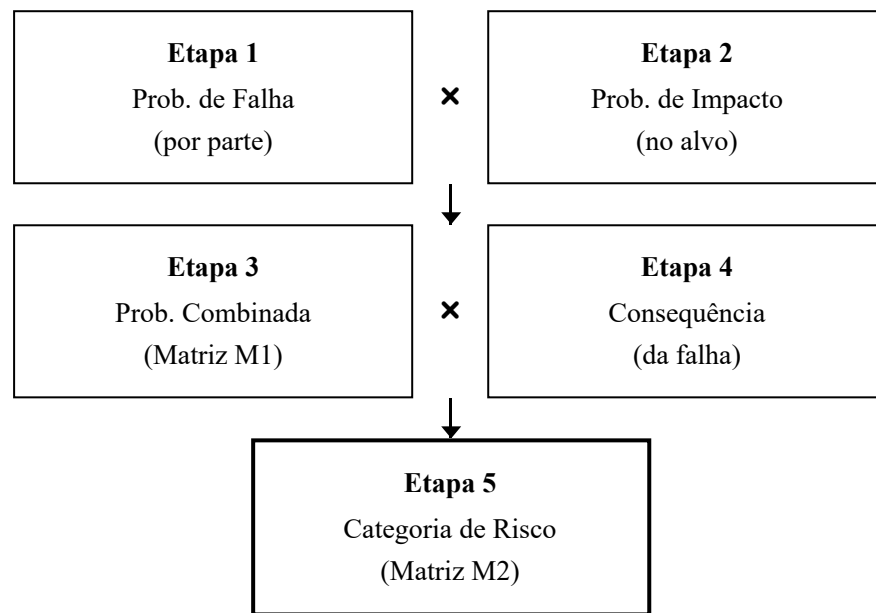


Figura 1 — Fluxo geral do modelo de avaliação de risco arbóreo.

As dimensões de categorias de risco (Matriz M1 e M2) são definidas a partir dos três eixos do TRAQ — probabilidade de falha, exposição do alvo e gravidade da consequência. A regra central do modelo é evitar que uma mesma *dimensão de risco* seja contada em mais de um eixo. Por exemplo, uma mesma variável pode, legitimamente, alimentar eixos diferentes quando descreve dimensões diferentes. A taxa de ocupação — frequência com que há alguém no alvo — é dimensão de exposição e entra só no impacto; não entra na consequência porque a frequência não altera a gravidade de um evento singular. A zona do alvo informa dois eixos por descrever duas dimensões distintas: no impacto, se o alvo está na área de queda; na consequência, quão próximo ele está e, portanto, quanta energia receberia em caso de falha. Do mesmo modo, a copa contribui com variáveis distintas a eixos distintos — seus defeitos entram na probabilidade de falha; seu tamanho, na consequência. O que a literatura descreve como duplicação de *fatores* é aqui tratado no nível da *dimensão* de risco: o *double-counting* que o modelo evita (seção 3.3) é a soma de uma mesma dimensão em dois eixos, não a presença de uma variável em mais de um.

2.2. Entradas do modelo

O modelo recebe cinco grupos de dados, coletados por inspeção visual de nível 1 (VTA):

Tabela 1 — Grupos de entrada e respectivas variáveis

Grupo	Variáveis	Eixo alimentado
Alvo	Zona do alvo (4 níveis), taxa de ocupação (4 níveis), possibilidade de mover o alvo (reduz impacto); possibilidade de restringir acesso (alimenta apenas as recomendações)	Impacto (Etapa 2)
Local	Topografia, declive (%), alterações do solo (5 opções), condições do solo (5 opções), clima predominante (2 opções)	Falha (modificador)
Saúde	Vigor (3 níveis), folhagem (3 níveis), pragas, abióticos	Falha (modificador)
Carga	Exposição ao vento (3 níveis), tamanho da copa (3 níveis), densidade da copa (3 níveis)	Falha (modificador) + Consequência
Defeitos	Copa (15 tipos), tronco (14 tipos), raízes (12 tipos) — cada um com peso de 1 a 4	Falha (Etapa 1) + Consequência (Etapa 4)

2.3. Etapa 1 — Probabilidade de falha

O modelo calcula a falha(p) da copa, tronco e raízes independentemente. A nota mais alta entre os três segmentos, originada pelo defeito mais grave, classifica a probabilidade de falha da árvore inteira — sem que as demais partes saudáveis influenciem o resultado. Cada defeito selecionado carrega um peso inteiro de 1 (leve) a 4 (crítico), atribuído com base na literatura de biomecânica arbórea.

O cálculo envolve quatro elementos: os pesos dos defeitos (w_i), de 1 a 4; o modificador de contexto global (M), que reflete condições do ambiente como solo compactado ou declive; o fator de sensibilidade de cada parte ($f(p)$), que pondera quanto aquela parte é afetada pelo contexto; e a função de classificação em nível (N), que converte a pontuação numérica em uma categoria (Improvável, Possível, Provável, Iminente).

$$\begin{aligned}
 \text{base}(p) &= \max(w_i) + 0,5 \times \sum(w_{j \neq \max}) \\
 \text{ponto}(p) &= \text{base}(p) + \text{round}(M \times f(p)) \quad (1) \\
 \text{falha}(p) &= N(\text{ponto}(p))
 \end{aligned}$$

Na prática, a fórmula $\text{max} + 0,5 \times \text{resto}$ dá mais peso ao defeito mais grave, mas ainda leva em conta o acúmulo dos demais. Assim, vários defeitos leves não superam um defeito crítico isolado.

O coeficiente 0,5 aplicado ao somatório dos defeitos secundários é um parâmetro heurístico, representando um meio-termo entre dois extremos: um coeficiente 0 consideraria apenas o defeito mais grave, ignorando o acúmulo; um coeficiente 1 equivaleria à soma simples dos pesos, que superestima o risco por acúmulo de defeitos moderados (ver caso D1, seção 3.2). A análise de sensibilidade (seção 3.4) mostra que essa escolha é pouco crítica: variar o coeficiente entre 0,4 e 0,6 não altera a categoria de risco em nenhum dos dez casos de calibração.

Para ilustrar, considere a copa de uma árvore com três defeitos — uma rachadura crítica (peso 4), uma inserção fraca (peso 2) e uma pequena cavidade (peso 1) — em solo compactado ($M = 1$):

$$\begin{aligned}\text{base}(\text{copa}) &= 4 + 0,5 \times (2 + 1) = 5,5 \\ \text{ponto}(\text{copa}) &= 5,5 + \text{round}(1 \times 0,50) = 5,5 + 1 = 6,5 \\ \text{falha}(\text{copa}) &= N(6,5) \rightarrow \mathbf{Provável}\end{aligned}$$

Tabela 2 — Fatores de sensibilidade ao contexto por parte

Parte	Fator $f(p)$	Justificativa
Copa	0,50	Menor influência do solo e ancoragem
Tronco	0,60	Sensibilidade intermediária
Raízes	0,70	Máxima influência do solo, declive, saturação

Tabela 3 — Modificador de contexto (*M*) — condições e acréscimos

Condição	Acréscimo
Folhagem morta (árvore morta)	+3
Vigor baixo	+2
Solo saturado	+2
Corte de raiz (alteração do local)	+2
Solo compactado	+1
Ventos fortes (clima predominante)	+1
Chuvas fortes (clima predominante)	+1
Exposição ao vento cheia	+1
Exposição cheia + copa densa (sinergia)	+1
Topografia em declive	+1
Declive $\geq 30\%$	+1
Declive + solo saturado (sinergia de tombamento)	+1

Nota: o modificador é cumulativo e nunca subtrativo (conservador). O máximo teórico é 15, atingido quando todas as condições compatíveis ocorrem juntas — o motor não soma o acréscimo de vigor baixo quando a folhagem indica morte, por serem estados mutuamente exclusivos.

Tabela 4 — Função de classificação *N*(ponto)

Ponto (<i>p</i>)	Nível de falha
≥ 8	Iminente
5 a 7	Provável
2 a 4	Possível
1	Improvável
0	Sem defeito

Pisos de segurança

Dois mecanismos de piso garantem coerência biomecânica:

- **Piso peso-4:** se qualquer defeito da parte possui peso ≥ 4 , a falha da parte é no mínimo "Provável", independentemente do cálculo numérico.

- **Piso de defeito crítico:** para defeitos do conjunto crítico (Deterioração do cerne, Anilhamento do caule, Morta — raiz), que representam falha estrutural total, a falha da parte é automaticamente "Iminente".

2.4. Etapa 2 — Probabilidade de impacto

A probabilidade de impacto quantifica a exposição do alvo à zona de queda potencial:

$$\begin{aligned} \text{nível} &= \max(N_{\text{zona}}, N_{\text{ocupação}}) \\ \text{se mover} &= \text{Sim e nível} > 1: \text{nível} -= 1 \\ \text{impacto} &= \{4: \text{Alto}, 3: \text{Médio}, 2: \text{Baixo}, 1: \text{Muito baixo}\}[\text{nível}] \end{aligned} \quad (2)$$

Tabela 5 — Níveis de zona e ocupação do alvo

Zona do alvo	Nível		Taxa de ocupação	Nível
Projeção da copa	4		Constante	4
1× altura da árvore	3		Frequente	3
1,5× altura da árvore	2		Ocasional	2
Fora da área	1		Raro	1

Exemplo: um alvo situado a 1× a altura da árvore (nível 3) com ocupação frequente (nível 3) resulta em $\text{nível} = \max(3, 3) = 3$. Se o alvo puder ser movido, o nível cai para 2, e a probabilidade de impacto é Baixa.

A redução por possibilidade de mover o alvo é limitada a −1 no máximo. A restrição de acesso, diferentemente, **não altera a probabilidade de impacto**: é tratada exclusivamente como ação de manejo recomendada (SPEC 8.3), evitando que uma mitigação ainda não executada rebaixe o risco calculado da árvore.

2.5. Etapa 4 — Consequência da falha

A consequência avalia a gravidade potencial do evento. Ela não considera a taxa de ocupação — dimensão de exposição, exclusiva do impacto —, mas incorpora a zona do alvo em seu papel de gravidade: a mesma proximidade que, no impacto, indica exposição, aqui indica quanta energia o alvo receberia (um evento na projeção da copa é mais grave que um a 1,5× a altura):

$$\begin{aligned} \text{score} &= T_{\text{zona}} + D_{\text{críticos}} + C_{\text{copa}} \\ \text{consequência} &= \max(\text{faixa}(\text{score}), \text{piso}_{\text{parte}}) \end{aligned} \quad (3)$$

Exemplo: uma falha de tronco com podridão confirmada e alvo a 1,5× a altura resulta em:

$$\begin{aligned} \text{score} &= T_{\text{zona}} + D_{\text{críticos}} + C_{\text{copa}} = 1 + 1 + 0 = 2 \rightarrow \text{Menor pela faixa} \\ \text{consequência} &= \max(\text{Menor}, \text{Significante}) = \text{Significante} \end{aligned}$$

A origem da falha é o tronco, cujo piso é Significante — e o piso prevalece.

Tabela 6 — Termos do score de consequência

Fator	Acréscimo
Alvo na projeção da copa	+3
Alvo em 1× altura	+2
Alvo em 1,5× altura	+1
Deterioração do cerne ou anilhamento do caule	+2
Fungo + cavidade (podridão confirmada)	+1
Copa ampla	+1

Tabela 7 — Faixas de consequência e pisos por parte

Score	Consequência		Origem da pior falha	Podridão?	Piso
≥ 7	Severa		Tronco ou raiz	Sim	Severa
4–6	Significante		Tronco ou raiz	Não	Significante
2–3	Menor		Copa	—	Sem piso
0–1	Insignificante				

O piso por parte reflete que a falha de tronco ou raízes constitui colapso estrutural total, nunca classificável como "Menor" ou "Insignificante".

2.6. Etapas 3 e 5 — Matrizes de combinação

A probabilidade combinada é obtida pelo cruzamento da pior falha com a probabilidade de impacto na Matriz M1. O risco final resulta do cruzamento da probabilidade

combinada com a consequência na Matriz M2.

	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto
Iminente	Improvável	Pouco provável	Provável	Muito provável
Provável	Improvável	Improvável	Pouco provável	Provável
Possível	Improvável	Improvável	Improvável	Pouco provável
Improvável	Improvável	Improvável	Improvável	Improvável

Figura 2 — Matriz M1: Probabilidade de Falha (linhas) × Probabilidade de Impacto (colunas) → Probabilidade Combinada.

	Insignificante	Menor	Significante	Severa
Muito provável	Baixo	Médio	Alto	Extremo
Provável	Baixo	Médio	Alto	Alto
Pouco provável	Baixo	Baixo	Médio	Médio
Improvável	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo

Figura 3 — Matriz M2: Probabilidade Combinada (linhas) × Consequência (colunas) → Categoria de Risco final.

2.7. Etapas 6–7 — Recomendações de manejo e urgência

A partir da categoria de risco, o sistema monta automaticamente um plano de manejo, indicando o nível de urgência (Imediata, Curto prazo, Médio prazo ou Rotina), definindo o intervalo de reavaliação (1, 3, 6 ou 12 meses) e listando ações de manejo específicas, escolhidas por um conjunto de regras a partir dos defeitos encontrados e do contexto.

Tabela 8 — Ações de manejo e seus gatilhos

Ação	Condição de ativação
Supressão (remoção total)	Risco Extremo ou Alto com defeito crítico/árvore morta
Poda de segurança	Galhos mortos, quebrados, codominância ou junções frágeis (se não supressão)
Poda de redução de copa	Exposição cheia, copa ampla ou densa (se não supressão nem poda seg.)
Poda de elevação	Galhos estendidos
Sistema de contenção	Codominância ou casca inclusa em copa/tronco
Tratamento de solo	Solo compactado, volume limitado, pavimentação ou corte de raiz
Avaliação instrumental	Fungo, deterioração do cerne, cavidade, inclinação ou levantamento de raízes
Restrição de acesso	Risco Alto/Extremo com alvo imóvel
Monitoramento periódico	Nenhuma ação acima ativada (fallback)

2.8. Catálogo de defeitos e pesos

Cada defeito inspecionável recebeu um peso inteiro entre 1 e 4, calibrado com base na literatura de biomecânica arbórea (Mattheck & Breloer, 1994; Lonsdale, 1999; Smiley et al., 2017) e na experiência operacional em campo — uma decisão de calibração, não uma derivação quantitativa a partir dessas fontes.

Os pesos refletem o potencial de cada defeito para causar falha estrutural da parte correspondente e correspondem exatamente aos aplicados pelo motor de cálculo. Como a análise de sensibilidade demonstra (seção 3.4), são eles o parâmetro ao qual o resultado é mais sensível, o que reforça a recomendação de calibração estatística futura (seção 4.2).

Tabela 9 — Defeitos da copa e galhos com pesos atribuídos

Defeito	Peso	Justificativa
Copa desequilibrada	1	Carga assimétrica, baixo risco isolado
Galhos/ramos mortos	2	Queda imprevisível, peso moderado
Galhos/ramos quebrados	3	Falha parcial já materializada
Galhos/ramos estendidos	1	Sobrecarga pontual
Rachaduras	3	Propagação de fratura sob carga
Codominância	2	Junção estruturalmente fraca
Junções frágeis	3	Alto risco de cisalhamento
Cavidades/orifícios de ninho	2	Perda de seção resistente
Casca morta/ausente	2	Indicador de necrose cambial
Cancro/galha/tumor	2	Fragilização localizada
Cogumelo/fungo	3	Indicador de podridão ativa
Casca inclusa	3	Impede fusão de tecidos estruturais
Dano/deterioração do alburno	2	Compromete transporte de seiva
Danos por raios	3	Destrução longitudinal do câmbio
Deterioração do cerne	4	Falha estrutural total (crítico)

Tabela 10 — Defeitos do tronco com pesos atribuídos

Defeito	Peso
Casca morta/ausente	2
Textura/cor anormal da casca	1
Ramos codominantes	2
Casca inclusa	4
Rachaduras	4
Dano/deterioração do alburno	2
Cancro/galha/tumor	2
Exsudação de seiva	2
Danos por raios	3
Deterioração do cerne	4
Cogumelo/fungo	4
Cavidades/orifícios de ninho	3
Madeira de reação	1
Ângulo de inclinação	3

Tabela 11 — Defeitos de raízes e colo com pesos atribuídos

Defeito	Peso
Colo soterrado/não visível	2
Anilhamento do caule	4 (crítico)
Morta	4 (crítico)
Deterioração	3
Cogumelo/fungo	4
Exsudação de seiva	2
Cavidade	3
Rachaduras	3
Raízes cortadas/danificadas	3
Levantamento de raízes	3
Condições de fragilidade do solo	2
Madeira de reação	1

2.9. Ajuste por razão t/R (parede residual)

Quando uma cavidade é identificada no tronco ou nas raízes, o modelo permite o ajuste do peso do defeito pela razão t/R (espessura da parede residual / raio). O critério do limiar $t/R \approx 0,33$ é **empírico**: Mattheck e Breloer (1994), a partir de extenso levantamento de campo, verificaram que as árvores que haviam falhado tendiam a ter parede residual inferior a cerca de um terço do raio; não se trata de derivação teórica de resistência, mas de regra de triagem observacional:

Tabela 12 — Ajuste de peso pela razão t/R

Razão t/R	Interpretação	Ajuste do peso
$\geq 0,33$	Parede adequada	Peso – 1 (mín. 1)
0,20 a 0,32	Parede comprometida	Peso mantido
$< 0,20$	Parede crítica	Peso $\rightarrow 4$

Nota: a "regra do terço" refere-se, na origem, à perda de momento de inércia — em $t/R \approx 0,3$ a redução do momento de inércia da seção é de cerca de um terço (Mattheck & Breloer, 1994). O limiar de parede residual $t/R \geq 0,33$ aqui adotado é o critério de triagem correspondente, amplamente usado em campo, e não deve ser confundido com a perda de resistência em si.

2.10. Módulo de visão computacional

Como módulo exploratório e complementar, o modelo integra uma análise por fotografias baseada no modelo multimodal GPT-5 mini (OpenAI, 2026). Por depender de um serviço externo e de conexão à internet, esse módulo opera à parte da proposta central de arquivo único offline (seção 2.11), funcionando como recurso opcional quando há conectividade disponível. O fluxo consiste em:

1. Captura de até 4 fotografias em campo (copa/geral, tronco, base/raízes, entorno), comprimidas no dispositivo para 1024 px e JPEG 80%.
2. Envio ao servidor (*serverless function*), que encaminha as imagens ao modelo de visão com um prompt estruturado contendo a lista exata de campos e opções do formulário.
3. O modelo retorna um JSON com preenchimentos sugeridos, incluindo nível de confiança.
4. O frontend aplica os campos da IA sem sobrescrever seleções manuais anteriores, marcando-os visualmente (bordas azuis com indicador ★).

Antes de chegar ao frontend, a resposta do modelo passa por uma validação no servidor que descarta qualquer valor fora das listas de opções do formulário: valores que não pertençam ao vocabulário controlado são rejeitados, de modo que a saída aplicada é sempre um subconjunto das opções válidas.

Tabela 13 — Cobertura esperada do módulo de visão por tipo de campo

Cobertura alta	Cobertura parcial	Fora de escopo
Copa desequilibrada	Rachaduras	Deterioração do cerne
Galhos mortos/quebrados	Cancro/tumor	Solo saturado/compactado
Codominância	Cavidades	Razão t/R
Cogumelo/fungo	Colo soterrado	DAP preciso
Inclinação do tronco	Levantamento de raízes	Histórico de podas
Tamanho/densidade da copa	Vigor (cor da folhagem)	
Topografia	Zona do alvo	
Galhos estendidos	Taxa de ocupação	

Nota: a tabela é uma delimitação de escopo a priori, não uma medição de desempenho. Os níveis de cobertura são estimativas qualitativas que deverão ser validadas com corpus de pelo menos 30 laudos com gabarito humano.

2.11. Implementação e verificação

O modelo foi implementado como aplicação web de arquivo único (HTML + CSS + JavaScript), sem dependências externas de CDN ou frameworks. A verificação de consistência utilizou um *harness* automatizado (`harness-risco.mjs`) que executa 10 casos de calibração (*golden cases*) contra o motor de cálculo extraído do código-fonte, comparando os resultados com os valores esperados. Trata-se de uma verificação de software (o motor reproduz a lógica projetada), não de uma validação empírica contra desfechos reais de campo.

3. Resultados

3.1. Casos de calibração

Os dez casos de calibração, representando cenários representativos e de regressão da arborização urbana de São Paulo, foram todos aprovados pelo harness automatizado (10/10, execução de 25 de junho de 2026; reexecutado em 17 de julho de 2026 após ajuste do modificador de contexto, com os 10/10 mantidos):

Tabela 14 — Resultados dos casos de calibração

#	Cenário	Pior falha	Impacto	Consequência	Risco	Status
1	Ficus em escola, fungo no tronco, alvo 1×/constante	Provável	Alto	Severa	Alto	✓
2	Árvore sadia, alvo fora da área	—	Muito baixo	Insignificante	Baixo	✓
3	Raiz podre + levantamento, praça lotada, alvo sob copa	Iminente	Alto	Severa	Extremo	✓
4	Galho morto isolado, alvo ocasional 1,5×	Possível	Baixo	Insignificante	Baixo	✓
5	Cerne 100% deteriorado isolado, alvo crítico	Iminente	Alto	Severa	Extremo	✓
6	Levantamento de raiz + declive 35% + solo saturado, alvo 1×/frequente	Provável	Médio	Significante	Médio	✓
7	Caso 1 com restringir=Sim (a restrição não altera o impacto)	Provável	Alto	Severa	Alto	✓
8	Podridão na copa não eleva a consequência de falha no tronco	Provável	Médio	Significante	Médio	✓
9	Empate "Provável" entre copa e tronco (duas partes críticas)	Provável	Médio	Significante	Médio	✓
10	Alvo incompleto + defeito crítico (risco não calculável)	Iminente	—	—	—*	✓

* Caso 10: com a zona/ocupação do alvo não preenchidas, o modelo recusa-se a emitir categoria de risco (retorna indefinido), em vez de classificar incorretamente como "Baixo" — comportamento exigido pela SPEC 7.2. O harness valida que o risco não é "Baixo".

3.2. Comportamento do modelo em casos extremos

Quatro cenários extremos foram examinados por diagnóstico (D1–D4). Diferentemente dos dez casos de calibração — que o harness verifica contra um resultado esperado (*assert*) —, estes não têm gabarito: são demonstrações do comportamento do modelo em casos extremos, e ilustram as decisões de projeto sem constituir validação:

- **D1 — 4 defeitos peso 2 na copa:** a soma pura dos pesos seria 8 ("Iminente"), mas a fórmula $\text{max} + 0,5 \times \text{resto}$ produz $2 + 0,5 \times 6 = 5$, classificada como "Provável" — corrigindo a superestimação por acúmulo de defeitos moderados (risco final "Baixo" com alvo neutro).
- **D2 — peso 4 isolado (rachadura no tronco):** o mecanismo de piso peso-4 garante "Provável" independentemente do contexto, evitando que a classificação numérica (base = 4, "Possível") subestime um defeito crítico.
- **D3 — contexto ruim sem defeito + alvo crítico:** o risco permanece "Baixo" porque a falha não dispara sem defeito estrutural identificado — o modelo exige evidência de falha potencial, não apenas exposição.
- **D4 — levantamento de raiz (peso 3) em terreno plano:** falha "Possível" e risco "Baixo"; o mesmo defeito, no caso 6 (declive 35% + solo saturado), escala para "Provável" e risco "Médio" — evidenciando a sensibilidade ao contexto pelo modificador.

3.3. Correção do double-counting

O caso de calibração #1 (Ficus em escola) demonstra a separação das dimensões de risco. Caso a taxa de ocupação "Constante" fosse contabilizada também na consequência (*double-counting*), a compensação cruzada entre os eixos tenderia a deslocar o resultado; com a ocupação alimentando exclusivamente o eixo de impacto, o resultado é "Alto", coerente com a leitura qualitativa da estrutura TRAQ para um alvo de ocupação constante e próximo à árvore.

O caso #7 valida uma decisão de projeto explícita: marcar a possibilidade de restringir o acesso (*restringir = Sim*) **não** altera a probabilidade de impacto nem o risco calculado, mantendo o mesmo resultado "Alto" do caso #1. Diferentemente de mover o alvo (*moverAlvo = Sim*), que reduz a exposição em um nível, a restrição é registrada apenas como ação de manejo recomendada — porque uma restrição ainda não implementada não deve rebaixar o risco quantificado da árvore (SPEC 8.3).

3.4. Análise de sensibilidade

Para avaliar a robustez do modelo à calibração de seus parâmetros, cada parâmetro foi perturbado isoladamente e os dez casos de calibração foram reexecutados, contando-se em quantos a categoria de risco final se altera. Foram testados os cinco conjuntos de parâmetros calibrados manualmente do modelo — aqueles cujos valores foram atribuídos por julgamento, e não derivados de teoria. As entradas de cenário (zona do alvo, taxa de ocupação, presença de cada defeito) não são parâmetros e ficam fora da análise; os *acréscimos* do modificador de contexto (Tabela 3), por outro lado, são parâmetros de calibração como os pesos e foram incluídos.

Tabela 15 — Sensibilidade da categoria de risco à perturbação dos parâmetros

Parâmetro perturbado	Perturbação	Casos que mudam (de 10)
Pesos dos defeitos	± 1	5
Acréscimos do modificador (Tabela 3)	± 1	2
Limiares de classificação (2/5/8)	± 1	1
Coefficiente de agregação (0,5)	$\rightarrow 0,4$ e $0,6$	0
Fatores de sensibilidade $f(p)$	$\pm 0,1$	0

Nota: cada célula é a união das duas direções de perturbação. As perturbações são assimétricas: reduzir todos os pesos em 1 rebaixa quatro casos de categoria, enquanto aumentá-los eleva apenas um — indício de que os casos operam, em média, próximos ao limite inferior de suas faixas. O caso 6 (levantamento de raiz + declive + solo saturado) é o mais sensível do conjunto, alterando-se sob três das cinco perturbações, o que o caracteriza como um caso extremo genuíno.

O resultado delimita o ponto sensível do modelo. O coeficiente de agregação e os fatores $f(p)$ são robustos: perturbá-los não altera nenhum resultado, confirmando que seus valores exatos não são críticos. Os limiares de classificação e os acréscimos do modificador são pouco sensíveis (um e dois casos, respectivamente). **Os pesos dos defeitos, ao contrário, são o parâmetro determinante: metade dos casos muda de categoria sob variação de apenas um ponto.** Esse achado confirma quantitativamente a limitação registrada na seção 4.2 — os pesos foram calibrados empiricamente contra cenários conhecidos, sem derivar de um modelo probabilístico formal. É sobre eles, e não sobre a estrutura de cálculo, que a validação estatística futura contra um banco de falhas documentadas teria maior efeito.

3.5. Poder discriminante: fórmula versus pisos

O nível de falha de uma árvore pode ser decidido de duas formas: pela fórmula numérica (soma ponderada dos defeitos, seção 2.3) ou por um dos pisos de segurança, que

travam um resultado mínimo e ignoram a conta quando um defeito isolado já é grave demais para depender de média. A dúvida que este teste responde é simples: a fórmula realmente decide alguma coisa, ou os pisos assumem o trabalho na maioria dos casos? Para responder, verificou-se, em cada um dos 10 casos, qual dos dois mecanismos determinou o **nível de falha da parte crítica** (não a categoria de risco final, que depende também do alvo e da consequência).

Tabela 16 — Mecanismo que decide o nível de falha da parte crítica

Mecanismo decisor	Casos (de 10)	Quais
Fórmula numérica	4	3, 4, 6, 9
Piso peso-4	3	1, 7, 8
Piso de defeito crítico	2	5, 10
Sem falha (ausência de defeito)	1	2

Nota: a tabela classifica o que decide o nível de falha, não a categoria de risco final. O caso 10, por exemplo, tem falha "Iminente" fixada pelo piso crítico, mas não recebe categoria de risco (o alvo incompleto impede a emissão — seção 3.1).

Dos nove casos com defeito estrutural, a fórmula decidiu sozinha em quatro (casos 3, 4, 6, 9) e um piso decidiu nos outros cinco. O padrão faz sentido: a fórmula entra em ação quando há vários defeitos moderados, cujo efeito somado precisa ser ponderado. Os pisos entram quando um único defeito já é grave o bastante para não admitir gradiente — peso 4 ou da lista crítica representa falha total ou iminente por definição, e diluí-lo numa média com defeitos menores mascararia a gravidade real. Os dois mecanismos são, portanto, complementares: a fórmula não é decorativa (decide quase metade dos casos com defeito), mas também não é o único mecanismo de segurança do modelo — conforme a decisão de projeto descrita na seção 4.1.

4. Discussão

4.1. Decisões de projeto e suas justificativas

O modelo procura corrigir três problemas frequentes nos sistemas de cálculo de risco arbóreo. O primeiro é o *double-counting*, que distorce o resultado sem deixar claro como isso aconteceu. O segundo é a ausência de pisos biomecânicos: sem eles, uma falha de tronco ou de raiz, que significa colapso total, pode ser subestimada pelo número. O terceiro é a falta de separação clara entre os eixos, que prejudica a reprodutibilidade.

Para somar os defeitos, a fórmula $\max + 0,5 \times \text{resto}$ funciona como alternativa à soma direta: destaca o defeito dominante sem descartar os demais. É uma escolha heurística, adotada por reproduzir melhor o comportamento observado em campo — vários defeitos leves não equivalem a um defeito crítico isolado — e não deriva de um modelo formal de agregação de risco.

4.2. Limitações conhecidas

O modelo apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados:

1. **Modificador global vs. por parte:** o modificador de contexto M é um escalar global multiplicado por fatores diferenciados ($f(p)$), mas não permite bônus específicos por parte. Por exemplo, o declive afeta primariamente as raízes, mas o modelo não aplica esse bônus exclusivamente a elas. A imprecisão é atenuada pelo fator $f(\text{raízes}) = 0,70 > f(\text{copa}) = 0,50$, que direciona maior peso contextual para as raízes.
2. **Conservadorismo unidirecional:** o modificador nunca é subtrativo — vigor alto ou solo ideal não geram crédito. Essa decisão é conservadora por design, priorizando a segurança, mas pode sobreestimar o risco em árvores excepcionalmente saudáveis em contextos favoráveis.
3. **Crítério t/R contestado:** o ajuste opcional pela razão t/R adota a "regra do terço" de Mattheck e Breloer (1994), critério consagrado na prática de campo mundial, mas cuja validade é objeto de controvérsia aberta. Kane e Ryan (2004) mostraram que a regra superestima a perda de capacidade em troncos com podridão descentrada ou cavidades assimétricas ($t/R < 0,3$ com perda real de momento de inércia inferior a um terço), enquanto Gruber (2008) argumenta que ela falha também na direção oposta — árvores de copa cheia com t/R acima de 0,32 podem romper sob carga externa —, sustentando que o critério é *mono-paramétrico*: ignora a carga efetivamente aplicada à árvore, da qual a falha depende de forma significativa. A crítica não é consensual: a literatura de revisão reafirma a relação entre a perda de parede residual e a redução da capacidade de

carga da seção (Dahle et al., 2017), e o próprio Mattheck e colaboradores (2015) passaram a recomendar que a regra nunca seja aplicada dogmaticamente, mas sempre à luz das condições prevalecentes. A adoção do t/R neste modelo é, portanto, uma escolha consciente: ele entra apenas como ajuste opcional e secundário, acionado somente diante de medição instrumental (tomografia, resistografia), e nunca como determinante isolado da classificação. A principal objeção — a de ignorar a carga — é parcialmente atenuada neste modelo, em que a carga externa é tratada em eixo próprio (exposição ao vento, tamanho e densidade da copa) no modificador de contexto. Reconhece-se, por fim, que a análise rigorosa de troncos ocos exigiria considerar a assimetria da seção, a ortotropia da madeira e a iniciação de fissuras tangenciais — fora do escopo de uma avaliação visual de nível 1.

4. **Calibração dos pesos:** os pesos (1 a 4) e os limiares (2/5/8) foram calibrados empiricamente contra cenários conhecidos, sem derivar de um modelo probabilístico formal. Uma validação futura com banco de dados de falhas reais permitiria calibração estatística. A análise de sensibilidade (seção 3.4) mostra que os pesos são justamente o parâmetro ao qual o resultado é mais sensível — 5 dos 10 casos de calibração mudam de categoria sob variação de apenas um ponto —, o que significa que o elo mais frágil da cadeia de calibração é também o mais determinante para o resultado final.
5. **Deterioração do cerne como defeito fatal:** o modelo classifica a deterioração do cerne automaticamente como "Iminente", independentemente da extensão do dano. Tecnicamente, a gravidade depende do volume de cerne comprometido — deterioração incipiente difere substancialmente de deterioração avançada. Essa simplificação é conservadora por design, priorizando a segurança, mas pode superestimar o risco em casos de deterioração inicial. Uma versão futura poderia graduar a severidade do defeito conforme a extensão estimada em campo. A assimetria é notável: a cavidade recebe graduação fina por razão t/R (Tabela 12, seção 2.9), mas a deterioração do cerne — defeito de natureza semelhante, perda de material estrutural interno — permanece binária, sem métrica equivalente de extensão.
6. **Módulo de visão:** a acurácia do pré-preenchimento por IA depende fortemente da qualidade, ângulo e iluminação das fotografias, e não substitui a inspeção presencial. Defeitos internos (deterioração do cerne, saturação do solo) estão fora do escopo da visão computacional.
7. **Validação de combinações na entrada:** o formulário não valida combinações mutuamente exclusivas na entrada (por exemplo, aceita marcar folhagem ausente por morte junto com vigor baixo); o motor trata o caso ignorando o acréscimo redundante, mas a validação na coleta permanece como melhoria futura.

4.3. Conformidade regulatória

O modelo foi projetado em observância à Lei Municipal 17.794/2022 de São Paulo, que regulamenta o manejo da vegetação arbórea no município. A saída do sistema atende diretamente dois dos requisitos mínimos do laudo técnico previstos no art. 9º da lei: a **justificativa da necessidade de intervenção** (inciso IV) e o **enquadramento legal da intervenção** (inciso V) — a categoria de risco calculada fundamenta a justificativa, e o resultado "Extremo" ou "Alto" conecta-se ao art. 14, IV (supressão quando o espécime "apresentar risco de queda") e à caracterização de urgência do art. 20, §2º (risco de queda que ameaça a vida, a integridade física ou o patrimônio). O manejo, nos termos do art. 8º, II, da lei, deve ser orientado por profissional habilitado — engenheiro agrônomo, engenheiro florestal ou biólogo inscrito em seu órgão de classe —, e o aviso técnico gerado pelo sistema explicita que o modelo não substitui essa avaliação presencial. A estrutura de registro de defeitos, classificação de risco e recomendações também dialoga com as normas técnicas de referência da área — a ABNT NBR 16246-1:2013, no âmbito nacional, e o padrão ANSI A300 (2023, cláusula 13), no âmbito internacional —, das quais o modelo incorpora a lógica de inspeção sistemática e de categorização de risco.

4.4. Aplicações e extensibilidade

A implementação como aplicação web de arquivo único, sem dependências externas, permite uso em campo em dispositivos móveis, inclusive offline. A arquitetura do motor de cálculo — funções puras que recebem entradas e retornam resultados sem efeitos colaterais — facilita a integração com sistemas de gestão de patrimônio arbóreo e a exportação para laudos em PDF.

O módulo de visão computacional, ainda em fase de prova de conceito, indica o potencial de modelos multimodais de linguagem para assistir a triagem arbórea em larga escala, particularmente em contextos de inventário urbano onde o volume de indivíduos torna a inspeção manual integralmente detalhada inviável.

Como material de apoio à aplicação do modelo em campo, o Apêndice A reúne um guia de avaliação de risco que orienta o preenchimento dos campos e a interpretação das categorias de risco, servindo de referência prática para o avaliador.

5. Conclusão

A ferramenta descrita coloca em prática a avaliação de risco de queda de árvores apoiada em três decisões de projeto: separar as dimensões de risco, por eliminar o *double-counting*; usar pisos biomecânicos para as falhas estruturais totais; e manter o cálculo determinístico, de modo que a mesma entrada gere sempre o mesmo resultado — reprodutibilidade computacional, não objetividade entre avaliadores, já que a entrada em si permanece uma leitura subjetiva de campo (seção 1.1).

Os dez casos de calibração, incluindo situações de regressão e de fronteira, mostram que o motor reproduz a estrutura ISA-TRAQ e se mantém coerente com o julgamento de quem trabalha com árvores. Isso confirma o funcionamento do cálculo, mas não equivale a uma validação em campo.

O módulo de visão computacional introduz a possibilidade de pré-preenchimento assistido, reduzindo o tempo de inspeção em campo sem comprometer a autonomia do avaliador, que mantém controle total sobre todos os campos antes do cálculo final.

Como continuidade, propõe-se um estudo de validação com N árvores avaliadas em campo por k avaliadores certificados TRAQ, comparando os resultados do modelo com o julgamento independente desses avaliadores. Esse estudo também permitiria calibrar estatisticamente os pesos dos defeitos e o módulo de visão computacional, hoje apoiados em heurísticas. Também seria útil diferenciar o perfil de risco por espécie e, mais adiante, ligar o cálculo a dados meteorológicos para ajustar o contexto em tempo real.

REFERÊNCIAS

- ABNT — ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16246-1:** florestas urbanas — manejo de árvores, arbustos e outras plantas lenhosas — parte 1: poda. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ANSI — AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **A300 Tree Care Standards:** cláusula 13 — tree risk assessment. [S. l.]: ANSI, 2023.
- DAHLE, G. A.; JAMES, K. R.; KANE, B.; GRABOSKY, J. C.; DETTER, A. A review of factors that affect the static load-bearing capacity of urban trees. **Arboriculture & Urban Forestry**, [S. l.], v. 43, n. 3, p. 89-106, 2017.
- DUNSTER, J. A.; SMILEY, E. T.; MATHENY, N.; LILLY, S. **Tree Risk Assessment Manual**. 2. ed. Atlanta: International Society of Arboriculture, 2017.
- ELLISON, M. J. Quantified tree risk assessment used in the management of amenity trees. **Arboriculture & Urban Forestry**, [S. l.], v. 31, n. 2, p. 57-65, 2005. DOI: 10.48044/jauf.2005.007.
- GRUBER, F. Untenable failure criteria for trees: I. The residual wall thickness rule. **Arboricultural Journal**, [S. l.], v. 31, p. 5-18, 2008.
- KANE, B.; RYAN, D. The accuracy of formulas used to assess strength loss due to decay in trees. **Journal of Arboriculture**, [S. l.], v. 30, n. 6, p. 347-356, 2004.
- KLEIN, R. W. et al. Evaluating the reproducibility of tree risk assessment ratings across commonly used methods. **Arboriculture & Urban Forestry**, [S. l.], v. 49, n. 6, p. 271-282, 2023.
- KOESER, A. K. et al. **Tree risk assessment methods:** a comparison of three common evaluation forms. Gainesville: UF/IFAS Extension, 2014. (ENH1226).
- LONSDALE, D. **The Principles of Tree Hazard Assessment and Management**. London: The Stationery Office, 1999. (Research for Amenity Trees, n. 7).
- MATTHECK, C.; BETHGE, K.; WEBER, K. **The Body Language of Trees:** encyclopedia of visual tree assessment. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2015.
- MATTHECK, C.; BRELOER, H. **The Body Language of Trees:** a handbook for failure analysis. Edição de D. Lonsdale, tradução de R. Strouts. London: HMSO, 1994. (Research for Amenity Trees, n. 4).

MULLANEY, J.; LUCKE, T.; TRUEMAN, S. J. A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. **Landscape and Urban Planning**, [S. l.], v. 134, p. 157-166, 2015.

NOWAK, D. J.; DWYER, J. F. Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems. In: KUSER, J. E. (ed.). **Urban and Community Forestry in the Northeast**. [S. l.]: Springer, 2007. p. 25-46.

OPENAI. **GPT-5 mini**. [S. l.]: OpenAI, 2026. Modelo de linguagem multimodal. Disponível em: <https://openai.com>. Acesso em: 17 jul. 2026.

SÃO PAULO (Município). Lei n. 17.794, de 27 de abril de 2022. Regulamenta o manejo da vegetação arbórea no município de São Paulo. **Diário Oficial da Cidade de São Paulo**, São Paulo, 2022.

SMILEY, E. T.; MATHENY, N.; LILLY, S. **Best Management Practices: tree risk assessment**. 2. ed. Atlanta: International Society of Arboriculture, 2017. Nota: em 2025 foi publicada a 3. ed. (BRANTLEY et al.); este trabalho refere-se à 2. ed., base sobre a qual o motor de cálculo foi estruturado, cuja arquitetura matricial não foi alterada pela edição posterior.

STEWART, M. G.; O'CALLAGHAN, D.; HARTLEY, M. Review of QTRA and risk-based cost-benefit assessment of tree management. **Arboriculture & Urban Forestry**, [S. l.], v. 39, n. 4, p. 165-172, 2013.

APÊNDICE A — GUIA DE AVALIAÇÃO DE RISCO DE ÁRVORES

GUIA COMPLETO

Como Funciona a Avaliação de *Risco* de Queda de Árvores

Um guia que explica, passo a passo, como um modelo de risco arbóreo transforma observações de campo em uma nota final — do básico ao técnico.

Arboristas

Leigos

Visual

SUMÁRIO

01	O que é risco de queda?	— não é só "vai cair?"
02	Conhecendo o alvo	— se cair, acerta quem?
03	O terreno onde ela vive	— o sapato da árvore
04	O check-up da árvore	— ela tá forte ou caidona?
05	Quanto empurrão ela aguenta	— o guarda-sol no vendaval
06	Os problemas da copa	— a cabeça da árvore
07	Os problemas do tronco	— a coluna vertebral
08	Os problemas das raízes	— a fundação do prédio
09	Juntando tudo	— batalha naval com duas tabelas
10	O que fazer agora?	— a receita do médico
11	Caso completo: a Tipuana da Rua Augusta	— passo a passo real
A	Apêndice técnico	— matrizes, pesos e fórmulas

CAPÍTULO 01

O que é risco de queda?

"Não é só 'vai cair?' — são 3 perguntas"

Quando olhamos para uma árvore e queremos saber se ela é perigosa, a primeira coisa que vem à cabeça é: **"será que ela vai cair?"**. Mas essa pergunta sozinha não basta.

💡 Imagina uma árvore podre num deserto onde ninguém nunca vai. Ela pode cair? Sim. É perigosa? **Não** — porque não tem ninguém pra se machucar. Risco não é só "vai cair", é "vai cair + acertar alguém + fazer estrago".

O modelo responde **3 perguntas** e depois cruza as respostas:

PERGUNTA 1

**Vai quebrar?**

Olha os defeitos da copa, tronco e raízes + o contexto (solo, vento, saúde)

PERGUNTA 2

**Vai acertar alguém?**

Olha quão perto as pessoas estão e com que frequência passam ali

PERGUNTA 3

**O estrago seria grande?**

Olha o tipo de falha (galho vs. árvore inteira) e o tamanho da copa

O resultado final é uma nota simples:

Baixo

Monitorar

Médio

Planejar

Alto

Agir em 30 dias

Extremo

Agir agora

🌳 ACOMPANHE: A TIPUANA DA RUA AUGUSTA

Ao longo deste guia, vamos avaliar uma árvore real: uma tipuana de 60 anos numa calçada movimentada de São Paulo. Ela tem 14 metros de altura, copa de 16 metros, e o dono do restaurante embaixo reclama que caem galhos secos "toda semana". A cada capítulo, vamos preencher uma parte da avaliação dela.

📄 NOTA TÉCNICA — FUNDAMENTAÇÃO

A metodologia é baseada no **TRAQ (Tree Risk Assessment Qualification)** da ISA (International Society of Arboriculture), aplicada ao contexto brasileiro. O TRAQ estrutura a avaliação em três componentes: *likelihood of failure*, *likelihood of impact* e *consequences*,

combinados em uma matriz de risco qualitativa. O modelo automatiza essa combinação mantendo a mesma lógica de decisão.

🚧 **Lembre-se:** risco = chance de quebrar × chance de acertar alguém × tamanho do estrago. As três coisas juntas.

CAPÍTULO 02

Conhecendo o Alvo

"Se cair, acerta quem?"

Antes de olhar pra árvore, o avaliador olha **ao redor dela**. Quem está perto? O que pode ser atingido? Com que frequência? E dá pra proteger?

Zona do Alvo — quão perto?

O modelo mede a distância em termos da própria árvore:

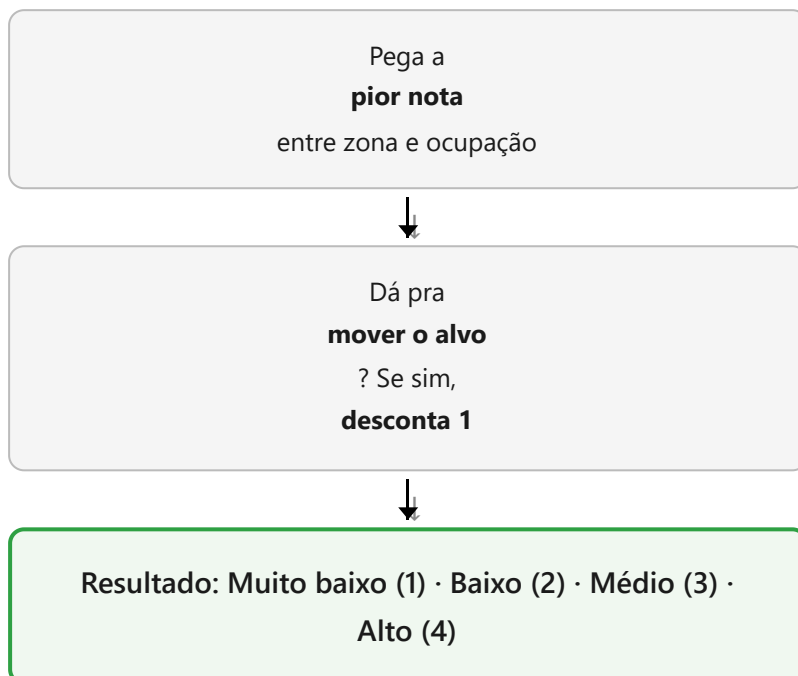
OPÇÃO	SIGNIFICA	NOTA
Projeção da copa	Embaixo da árvore — se cair um galho, cai na cabeça	4
1 × a altura	Se a árvore tem 10m, o alvo está a até 10m	3
1,5 × a altura	Se tem 10m, o alvo está a até 15m	2
Fora da área	Longe o suficiente pra não ser atingido	1

Taxa de Ocupação — tem gente ali sempre?

OPÇÃO	EXEMPLO	NOTA
Constante	Praça movimentada, estacionamento cheio	4
Frequente	Calçada de comércio	3
Ocasional	Rua residencial tranquila	2
Raro	Terreno baldio, área de serviço	1

Como fecha a nota?

O modelo compara as duas notas e **fica com a pior** (a maior). Depois, verifica se dá pra proteger:



💡 Imagina uma árvore num estacionamento lotado (**nota 4**). O dono decide mover os carros pra longe. Agora o impacto cai pra **nota 3**. Um único campo mudou a nota — e pode ser a diferença entre risco Alto e Extremo no final.

E por que não faz média?

Se o terreno embaixo da árvore é vazio (nota 1) mas o playground lotado está dentro da copa (nota 4), a média seria 2,5. Mas as crianças continuam embaixo da árvore. **O lado perigoso é o que importa.**

💡 É como atravessar a rua: se um lado está livre e do outro vem um caminhão, a média diz "perigo médio". Mas o caminhão te atropela igual.

🌿 TIPUANA DA RUA AUGUSTA — AVALIAÇÃO DO ALVO

O técnico olha ao redor: mesas do restaurante **embaixo da copa** (nota 4), pedestres **o dia inteiro** (nota 4). O dono pode mover as mesas pra longe da copa. → Pior nota: 4, desconto de 1 → **Impacto: Médio (3)**



NOTA TÉCNICA – LÓGICA DO CÁLCULO



```
n = Math.max(NZONA[zona], NOCUP[ocupacao])
```

Se moverAlvo === "Sim", aplica `n -= 1` (mínimo 1). Restringir acesso não altera o impacto — influencia apenas as recomendações de mitigação.

Mapeamento: 4 → "Alto", 3 → "Médio", 2 → "Baixo", 1 → "Muito baixo".

CAPÍTULO 03

O Terreno Onde Ela Vive

"O sapato da árvore"

Uma mesma árvore pode ser segura num lugar e perigosa em outro. Essa seção avalia o **terreno**, não a árvore. É o "sapato" dela — se o sapato é ruim, ela escorrega.

Topografia e Declive

CAMPO	O QUE SIGNIFICA	PONTOS
Plano	Chão reto	0
Declive	Ladeira — a gravidade puxa pro lado	+1
Declive ≥ 30%	Ladeira forte	+1 extra
Declive + Solo saturado	Ladeira + chão encharcado = sabão	+1 extra

Alterações no Local

Coisas que os humanos fizeram perto da árvore:

OPÇÃO	O QUE É	EFEITO
Nenhuma	Ninguém mexeu em nada	—
Mudança de nível do solo	Aterraram ou cavaram perto	Narrativa
Limpeza	Tiraram a vegetação ao redor	Narrativa
Hidrologia alterada	Mudaram o caminho da água	Narrativa
Corte de raiz	Cortaram raízes (obra, calçada)	+2 pontos

💡 Cortar raiz é como cortar os dedos dos pés de alguém e pedir pra ficar de pé num vendaval.

Condições do Solo

OPÇÃO	O QUE É	EFEITO
Volume Limitado	Raízes sem espaço (calçada estreita)	Narrativa
Saturado	Encharcado, virou lama	+2 pontos
Raso	Pouca terra sobre pedra	Narrativa
Compactado	Terra dura, pisoteada	+1 ponto
Pavimentação sob raízes	Asfalto/concreto em cima	Narrativa

Clima Predominante

OPÇÃO	EFEITO
Ventos Fortes	+1 ponto — vento empurra a copa
Chuvas Fortes	+1 ponto — encharca solo, pesa galhos

Direção do vento é texto livre — só entra na narrativa do laudo, sem pontos.

📌 Esses pontos não viram uma nota sozinhos. Eles formam o **modificador** — um número que depois é somado aos defeitos de cada parte da árvore, fazendo os

problemas ficarem "mais graves" quando o terreno é ruim.

TIPUANA DA RUA AUGUSTA – FATORES DO LOCAL

Chão **plano** (0), mas raízes **cortadas pela obra** (+2), solo **compactado** (+1), e São Paulo tem **chuvas fortes** (+1). Subtotal do local: **+4 pontos**.

NOTA TÉCNICA – FUNÇÃO MODIFICADOR()

A função `modificador(contexto)` acumula bonificações aditivas. Fatores independentes somam linearmente. A única interação é a sinergia **declive + saturado** (+1 extra), que modela o risco aumentado de tombamento em solo saturado com componente gravitacional lateral. O modificador total é multiplicado por fatores de parte (copa: 0.5, tronco: 0.6, raízes: 0.7) antes de entrar no cálculo de `falhaParte()`.

CAPÍTULO 04

O Check-up da Árvore

"Ela tá forte ou caidona?"

Se o capítulo anterior era sobre o terreno (o sapato), este é o **exame médico geral**. Antes de procurar defeitos específicos, o avaliador olha de longe: a árvore parece saudável?

Vigor — quanta energia ela tem?

OPÇÃO	O QUE O AVALIADOR VÊ	PONTOS
Alto	Crescendo bem, brotando, cheia de vida	0
Normal	Nem muito bem nem muito mal	0
Baixo	Pouco crescimento, galhos finos, definhando	+2 pontos

 Árvore com vigor baixo é como uma pessoa fraca e gripada — qualquer empurrãozinho derruba. O mesmo galho rachado que uma árvore forte aguenta, uma árvore fraca não segura.

Folhagem — tem folha ou não?

OPÇÃO	O QUE SIGNIFICA	PONTOS
Normal	Tem folhas, tá verde	0
Nenhum (sazonal)	Sem folha porque é inverno — normal pra espécie	0
Nenhum (morto)	Sem folha porque morreu	+3 pontos

💡 Árvore morta é um poste de madeira apodrecendo em pé. Não precisa de terremoto pra cair — um dia cai sozinha. É tipo um prédio abandonado: não precisa de ventania, a estrutura vai cedendo até desabar.

Pragas e Abióticos — o que mais está acontecendo?

Dois campos de texto livre onde o avaliador descreve pragas (cupins, erva-de-passarinho, brocas) e danos ambientais (seca, calor, poluição, vandalismo).

Nenhum dos dois soma pontos. São narrativa — vão pro laudo escrito. Por quê? Porque o efeito deles já aparece nos outros campos: se o cupim comeu o tronco, o avaliador vai marcar "Deterioração do cerne" nos defeitos. Somar aqui e lá seria contar o mesmo problema duas vezes.

💡 É como o médico anotar "paciente fuma" no prontuário. O cigarro em si não é a doença, mas piora todas as outras. O efeito do fumo já aparece no pulmão, no coração, na pressão — não precisa somar de novo.

Resumo dos pontos

CAMPO	PONTOS NO MODIFICADOR
Vigor = Baixo	+2
Folhagem = Morto	+3
Pragas / Abióticos	0 (narrativa)

Esses pontos vão pro **mesmo bolo** do capítulo anterior. Tudo junto vira o **modificador**.

 TIPUANA DA RUA AUGUSTA — SAÚDE

Vigor **baixo** (+2) — pouco crescimento, copa rala de um lado. Folhagem **normal** (tem folhas, não está morta). Pragas: erva-de-passarinho nos galhos altos (narrativa). Subtotal da saúde: **+2 pontos**. Modificador acumulado: 4 (local) + 2 (saúde) = **6 pontos**.

CAPÍTULO 05

Quanto Empurrão Ela Aguenta

"O guarda-sol no vendaval"

A copa da árvore é como um guarda-sol. Quanto maior e mais cheia de folhas, mais o vento empurra. Essa seção avalia o **tamanho do empurrão** que a árvore recebe.

Exposição ao Vento

OPÇÃO	EXEMPLO	PONTOS
Protegido	Cercada por prédios ou outras árvores	0
Parcial	Proteção de um lado, aberta do outro	0
Cheio	Sozinha, sem nada bloqueando	+1
Cheio + Copa Densa	Sozinha E copa cheia de folhas	+1 extra

 Pega um guarda-chuva aberto num dia de vento — o vento quase te carrega. Agora fecha o guarda-chuva — o vento nem te incomoda. Copa densa = guarda-chuva aberto. Copa rala = guarda-chuva fechado.

Tamanho Relativo da Copa

OPÇÃO	EFEITO
Pequeno / Médio	Sem efeito
Amplio	Não soma no modificador, mas soma +1 na consequência

Copa ampla não faz a árvore quebrar mais fácil — faz o **estrageo ser maior** quando quebra. Uma pedra pequena e uma grande caem com a mesma chance, mas a grande faz mais estrageo.

Densidade da Copa

Rala, Normal ou **Densa**. Sozinha não soma nada — mas Densa combinada com exposição "Cheio" ativa o **combo +1 extra**.

Ramos Interiores

Poucos, Normal ou **Muitos**. **Narrativa pura** — zero pontos. Informação pro técnico decidir que tipo de poda recomendar.

📌 Dessa seção inteira, no máximo saem **2 pontos** pro modificador (exposição cheio + combo densa). Parece pouco, mas esses pontos vão pro mesmo bolo de solo, saúde e clima — e juntos podem transformar um defeito "Possível" em "Iminente".

🌿 TIPUANA DA RUA AUGUSTA — CARGA

Exposição **parcial** (0), copa **ampla** (0 no modificador, +1 na consequência depois), densidade **normal** (0). Subtotal da carga: **0 pontos**. Modificador final: **6 pontos** (4 do local + 2 da saúde + 0 da carga).

CAPÍTULO 06

Os Problemas da Copa

"A cabeça da árvore"

Agora vamos examinar a árvore de verdade — começando pela "cabeça". Cada problema que o avaliador marca tem um **peso** de 1 a 4:

1

Esquisito,
mas ok

2

Precisa
atenção

3

Pode
quebrar

4

Pode cair
a qualquer hora

Os 15 defeitos da copa

1

Copa desequilibrada

Cresceu mais pra um lado. Como carregar mochila só num ombro — fica torta, mas a madeira saudável aguenta.

2

Galhos/Ramos mortos

Galhos secos, sem folha. **Vão** cair — a questão é quando. Num dia de vento ou até de sol, sem aviso.

3

Galhos/Ramos quebrados

Já rachou, tá pendurado. Não é "pode quebrar um dia" — **já quebrou**, só não soltou ainda.

1

Galhos/Ramos estendidos

Galhos muito compridos, braço esticado. Mais alavanca, mas madeira saudável aguenta o peso.

3

Rachaduras

A madeira está dizendo "não estou aguentando". Falha estrutural em andamento — como rachadura numa viga.

2

Codominância

Dois galhos do mesmo tamanho nascendo do mesmo ponto (forma de Y). O encaixe em V é instável — com vento, pode rachar no meio.

3

Junções frágeis

O encaixe entre galhos já mostra sinais de fraqueza. É a codominância que **já está falhando**.

2

Cavidades / Orifícios de ninho

Buracos na madeira. Menos madeira = menos resistência. Combinado com fungo, confirma podridão interna.

2

Casca morta/ausente

A "pele" da árvore caiu. Madeira exposta = porta aberta pra fungos e insetos. Como ferida aberta.

2

Cancro/Galha/Tumor

Inchaços ou feridas na madeira. Sinal de doença, mas o galho pode estar firme ao redor.

3

Cogumelo/fungo

Fungo visível = **por dentro já está podre**. Quando aparece na superfície, já comeu bastante madeira. Como ver fumaça saindo da parede.

3

Casca inclusa

Casca presa dentro da junção. Os galhos nunca se fundiram — estão só encostados. Como colar madeira com fita crepe em vez de cola.

2

Dano/Deterioração do alburno

A camada viva sob a casca (as "veias") está danificada. Sem nutrientes, o galho enfraquece.

3

Danos por raios

Raio explode a madeira de dentro pra fora. Parece cicatriz por fora, mas por dentro pode estar todo fragmentado.

4

Deterioração do cerne**FATAL**

O "osso" da árvore está podre. **Pior defeito possível**. Vai direto pra "Iminente" — não importa mais nada. É um poste oco.

 NOTA TÉCNICA – REGRAS ESPECIAIS

Peso ≥ 4 → piso "Provável": qualquer defeito com peso 4 garante nota mínima "Provável", mesmo sozinho e sem modificador.

Defeito fatal → "Iminente" direto: "Deterioração do cerne" está no set FATAL. Se marcado, `falhaParte()` retorna "Iminente" independente da soma.

Set PODRIDAO: "Cogumelo/fungo", "Deterioração do cerne", "Cavidade" e "Cavidades/Orifícios de ninho" influenciam o cálculo de consequência. O piso de consequência (tronco/raízes) consulta somente os defeitos da própria parte — podridão na copa não eleva o piso de outra parte.

**TIPUANA DA RUA AUGUSTA – DEFEITOS DA COPA**

O técnico vê: **galhos mortos** (peso 2), **galho quebrado** pendurado (peso 3), **copa desequilibrada** (peso 1), **codominância** (peso 2).

Pior = 3; resto = $(2+1+2) \times 0,5 = 2,5$; modificador $\times 50\% = 6 \times 0,5 = 3$. Total: $3 + 2,5 + 3 = 8,5 \rightarrow$ **Iminente**

CAPÍTULO 07

Os Problemas do Tronco

"A coluna vertebral"

Se a copa é a cabeça, o tronco é a **coluna**. Se ele falha, não cai um galho — cai a árvore inteira. Por isso vários defeitos que eram peso 3 na copa viram **peso 4 no tronco**.

O tronco recebe **60% do modificador** (contra 50% da copa) — o terreno ruim afeta mais a estrutura principal.

Os 14 defeitos do tronco

2

Casca morta/ausente

Tronco sem casca = tronco aberto pra fungos e insetos. A armadura caiu.

1

Textura/cor anormal da casca

Mancha na pele — pode não ser nada, pode ser sinal. O técnico anota e fica de olho.

2

Ramos codominantes

A árvore se divide em dois troncos iguais. Se o Y rachar, metade da árvore inteira cai.

4

Casca inclusa ⚠

Casca presa na forquilha do tronco. **Peso 4 aqui** (era 3 na copa) — pode rachar a árvore ao meio como um zíper.

4

Rachaduras ⚠

O tronco está se abrindo. **Peso 4 aqui** (era 3 na copa) — rachadura na coluna é muito pior que no braço.

2

Dano/Deterioração do alburno

As "veias" do tronco estão danificadas. Compromete nutrição, mas o cerne pode estar intacto.

Cancro/Galha/Tumor

2 Área doente no tronco, mas pode estar forte ao redor.

2 **Exsudação de seiva**

Tronco "chorando" líquido. Sinal de ferida ou infecção interna — como ferida que não para de sangrar.

3 **Danos por raios**

Raio no tronco fragmenta a estrutura principal. Precisa de tomografia pra ver o estrago real.

4 **Deterioração do cerne** **FATAL**

Tronco oco por dentro. Emergência total — **direto pra "Iminente"**.

4 **Cogumelo/fungo** ⚠

Peso 4 aqui (era 3 na copa). Fungo no tronco = podridão na estrutura principal. Risco de tombamento total.

3 **Cavidades / Orifícios de ninho**

Peso 3 aqui (era 2 na copa). Buraco na parede de carga — muito mais perigoso que buraco no beiral.

Ajuste por Razão t/R — a regra do 1/3

Mas ter um buraco no tronco não significa automaticamente que vai cair. O que importa é **quanta madeira boa sobrou ao redor**.

💡 Imagina um cano de PVC. Se a parede do cano é grossa, ele aguenta pressão mesmo tendo um espaço oco no meio. Mas se a parede fica fininha, qualquer aperto esmaga. O tronco oco funciona igual — é um tubo. Se a "parede" de madeira saudável ao redor do oco é grossa o suficiente, ele ainda segura.

Essa medida se chama **razão t/R**:

- **t** = espessura da parede residual (a madeira boa que sobrou)
- **R** = raio total do tronco
- **t/R** = quanto da parede sobrou, em proporção

O modelo tem um campo **opcional** de t/R que aparece quando você marca cavidade no tronco ou nas raízes. Se o avaliador já mediu (com tomografia ou

resistografia), ele informa e o peso se ajusta:

T/R	SIGNIFICA	EFEITO NO PESO
$\geq 0,33$	Sobrou 1/3 ou mais — parede adequada	Peso diminui 1 (3→2)
0,20 a 0,32	Comprometida — na zona de risco	Peso mantido (3)
< 0,20	Crítica — parede muito fina	Peso sobe pra 4
Não informado	Sem medição instrumental	Peso mantido (padrão)

💡 Exemplo: um tronco de 60 cm de diâmetro (raio = 30 cm) com uma cavidade. Se a parede de madeira boa tem 12 cm → $t/R = 12/30 = 0,40$ → adequada, peso cai pra 2. Se tem só 5 cm → $t/R = 5/30 = 0,17$ → crítica, peso sobe pra 4.

🔧 NOTA TÉCNICA – REGRA DO T/R

A regra do t/R (ou t/D quando se usa diâmetro) é um critério **empírico** de Mattheck & Breloer, derivado de extenso levantamento de campo: as árvores que haviam quebrado tendiam a apresentar parede residual inferior a cerca de um terço do raio, o que fixou o limiar prático $t/R \approx 0,33$. A queda de capacidade de carga com o afinamento da parede **não é exponencial**: o momento de inércia da seção tubular depende da diferença entre as quartas potências dos raios externo e interno, de modo que a perda cresce lentamente enquanto a parede é espessa e acelera quando ela afina. Convém notar, porém, que a flexão pura não explica a falha de um tronco oco íntegro: Mattheck demonstrou que a ruptura costuma iniciar por **fissura longitudinal de cisalhamento** na parede, e não pela tensão de flexão em si — razão pela qual o t/R funciona como triagem grosseira, e não como cálculo de resistência; trata-se, além disso, de um critério contestado na literatura (ver seção 4.2 do corpo do trabalho). O modelo aplica o ajuste somente quando há medição instrumental (tomografia sônica, resistografia); sem medição, mantém o peso padrão e recomenda avaliação avançada.

1

Madeira de reação

O tronco criou madeira diferente pra compensar inclinação. Sinal de defesa, não de perigo.

3

Ângulo de inclinação

Tronco inclinado = vetor de queda definido. A gravidade puxa o tempo todo pro lado da inclinação.

Copa vs. Tronco — o que muda?

DEFEITO	COPA	TRONCO	POR QUÊ?
Casca inclusa	3	4	No tronco racha a árvore ao meio
Rachaduras	3	4	Galho rachado cai sozinho; tronco rachado derruba tudo
Cogumelo/fungo	3	4	Podridão na estrutura principal
Cavidades	2	3	Buraco na coluna vs. buraco no braço

📌 O padrão é claro: **o mesmo problema no tronco é mais grave**. É a diferença entre quebrar o dedo e quebrar a coluna.

🌿 TIPUANA DA RUA AUGUSTA — DEFEITOS DO TRONCO

O técnico vê: **deterioração do cerne** confirmada por tomografia (peso 4, FATAL), **cavidade** a 2m do chão (peso 3), **casca caída** do lado da rua (peso 2).

Defeito FATAL → **Iminente direto**. (Pontuação: 4 + 2,5 + 4 = 10,5 — confirmaria Iminente mesmo sem a regra fatal.)

CAPÍTULO 08

Os Problemas das Raízes

"A fundação do prédio"

As raízes são os **pés e a fundação**. Quando falham, a árvore não quebra — ela **tomba inteira**, com tudo, arrancando o chão junto. É o tipo mais perigoso de queda.

Por isso recebem **70% do modificador** — a maior fração. Solo encharcado, compactado, em declive, tudo afeta diretamente as raízes.

Os 12 defeitos das raízes

2

Colo soterrado / Não visível

A base do tronco está coberta por terra ou entulho. O problema é o que você **não consegue ver** — pode ter podridão escondida ali.

4

Anilhamento do caule

FATAL

Uma raiz está **estrangulando** o tronco na base. A árvore está se enforcando. Direto pra "Iminente".

4

Morta

FATAL

Raízes mortas = árvore **solta no chão**. De pé por inércia. Qualquer ventinho e tomba. Direto pra "Iminente".

3

Deterioração

Raízes apodrecendo. Fundação cedendo, mas pode ser parcial — se fosse total, seria "Morta".

4

Cogumelo/fungo ⚠

Fungo na base é o pior lugar. Muitos são decompositores de raiz — quando o cogumelo aparece, as raízes por baixo podem já estar destruídas.

2

Exsudação de seiva

Base "sangrando". Sinal de ferida ou infecção na raiz. Precisa investigar a causa.

3

Cavidade

Buraco no alicerce. A raiz que tinha madeira ali não existe mais — compromete ancoragem. Também aceita **ajuste por t/R** (mesma regra do tronco — veja capítulo 7).

3

Rachaduras

Fendas no solo ou nas raízes. Pode significar que a árvore está **se soltando do chão** em câmera lenta.

3

Raízes cortadas/danificadas

Obra cortou raízes. Cada raiz cortada é uma "corda" a menos segurando a árvore. Como cortar cabos de uma ponte.

3

Levantamento de raízes

Solo do lado oposto está subindo. **Tombamento em andamento**. A árvore já está se soltando — como prego sendo puxado do chão.

2

Condições de fragilidade do solo

Solo naturalmente fraco (areia, aterro). O chão não segura bem, como guarda-sol na areia da praia.

1

Madeira de reação

Raízes criaram madeira especial pra compensar uma força. Sinal de defesa, não de perigo.

Os 3 defeitos fatais do modelo

Dois deles são **exclusivos das raízes**:

DEFEITO FATAL	ONDE APARECE	EFEITO
Deterioração do cerne	Copa, Tronco	→ Iminente direto
Anilhamento do caule	Só raízes	→ Iminente direto
Morta	Só raízes	→ Iminente direto

🚧 Copa quebrada cai um galho. Tronco quebrado cai a árvore. Raiz quebrada a árvore **tomba com tudo** — e arranca o chão junto.

🌿 TIPUANA DA RUA AUGUSTA – DEFEITOS DAS RAÍZES

O técnico vê: **raízes cortadas** pela obra (peso 3), **colo soterrado** (peso 2), **orelha-de-pau na base** = cogumelo/fungo (peso 4).

Pior = 4; resto = $(3+2) \times 0,5 = 2,5$; modificador $\times 70\% = 6 \times 0,7 \approx 4$. Total: $4 + 2,5 + 4 = \mathbf{10,5 \rightarrow Iminente}$

CAPÍTULO 09

Juntando Tudo

"Batalha naval com duas tabelas"

Agora o modelo pega as 3 respostas e cruza em dois passos. É como batalha naval: você vai na linha, vai na coluna, e onde cruzar tem a resposta.

As 3 respostas prontas

PIOR FALHA

IMPACTO

CONSEQUÊNCIA

Improvável → Possível → Provável → Iminente

A pior nota entre copa, tronco e raízes

Muito baixo → Baixo → Médio → Alto

Quão perto e frequente é o alvo

Insignificante → Menor → Significante → Severa

Tamanho do estrago se falhar

Passo 1 — "Qual a chance real de acidente?"

Cruza a falha (vai quebrar?) com o impacto (vai acertar alguém?):

	MUITO BAIXO	BAIXO	MÉDIO	ALTO
Iminente	Improvável	Pouco provável	Provável	Muito provável
Provável	Improvável	Improvável	Pouco provável	Provável
Possível	Improvável	Improvável	Improvável	Pouco provável
Improvável	Improvável	Improvável	Improvável	Improvável

Resultado: a **Probabilidade Combinada** — chance de quebrar E acertar alguém.

💡 Repara: árvore caindo aos pedaços mas **sem ninguém perto** → probabilidade combinada baixa. Risco sem alvo não é risco — é só uma árvore doente num terreno vazio.

Passo 2 — "E o estrago?"

Cruza a probabilidade combinada com a consequência:

	INSIGNIFICANTE	MENOR	SIGNIFICANTE	SEVERA
Muito provável	Baixo	Médio	Alto	Extremo
Provável	Baixo	Médio	Alto	Alto
Pouco provável	Baixo	Baixo	Médio	Médio
Improvável	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo

E sai o **resultado final**: Baixo, Médio, Alto ou Extremo.

Por que tabelas e não uma conta?

As tabelas seguem a estrutura de matrizes de risco usadas na arboricultura internacional (ISA-TRAQ, ANSI A300), com limiares ajustados por julgamento técnico para uso local. Cada célula é uma **decisão qualitativa**, não uma fórmula — por isso funciona melhor que multiplicação ou média, que podem esconder o perigo.

 TIPUANA DA RUA AUGUSTA – CRUZAMENTO

Passo 1: Iminente × Médio → **Provável**

Passo 2: Provável × Severa → **ALTO** 

Se não desse pra mover as mesas → impacto seria "Alto" → Matriz 1 daria "Muito provável" → Matriz 2 daria **EXTREMO**. Um único campo fez a diferença.

CAPÍTULO 10

O Que Fazer Agora?

"A receita do médico"

Com o risco calculado, o modelo monta um **plano personalizado** — como um médico que escreve a receita depois do exame. Quatro partes:

1. Urgência — quão rápido agir?

RISCO	URGÊNCIA	PRAZO
Extremo	 Imediata	Agora — cerca a área primeiro
Alto	 Curto prazo	Até 30 dias
Médio	 Médio prazo	Até 90 dias
Baixo	 Rotina	Monitoramento regular

2. Reavaliação — quando voltar?

RISCO	PRAZO	DETALHES
Extremo	1 mês	Após cada intervenção + monitoramento semanal
Alto	3 meses	Ou imediatamente após evento climático
Médio	6 meses	Antecipar se houver tempestade ou novos danos
Baixo	12 meses	Inspeção anual no programa regular

3. Ações de Manejo — o que fazer com a árvore?

O modelo olha os **defeitos específicos** e monta a lista. São 8 ações possíveis + 1 padrão:



Supressão (remoção total)

Quando: risco Extremo, OU risco Alto + defeito fatal/árvore morta/falha Iminente.

Por quê: estrutura comprometida além de manejo conservador. Se acionada, as podas não aparecem (não faz sentido podar árvore que será removida).



Poda de segurança

Quando: sem supressão + galhos mortos, quebrados, codominância ou junções frágeis na copa.

Por quê: tira o galho problemático. O problema é um galho específico, tira o galho.



Poda de redução de copa

Quando: sem supressão, sem poda de segurança + exposição cheio, copa ampla ou densa.

Por quê: diminui a "vela" que o vento pega. Só aparece se a poda de segurança já não resolve.



Poda de elevação

Quando: sem supressão + galhos estendidos na copa.

Por quê: levanta a "saia" da copa — libera espaço pra pedestres (3m) e veículos (4,5m).



Sistema de contenção / cabo

Quando: sem supressão + codominância ou casca inclusa (copa ou tronco).
Por quê: amarra as partes que podem se separar. Não conserta, mas segura.



Tratamento de solo

Quando: solo compactado, volume limitado, pavimentação sob raízes, ou corte de raiz.
Por quê: se o problema é o solo, a solução é tratar o solo.



Avaliação instrumental avançada

Quando: sem supressão + fungo, deterioração, cavidade, inclinação, ou levantamento de raízes.
Por quê: precisa "ver dentro" da árvore — tomografia sônica, resistografia.



Restrição de acesso

Quando: risco Alto/Extremo + não dá pra mover o alvo.
 Se não dá pra restringir → 🚫 restrição física forçada.
 Se dá pra restringir → 🚧 implementar a restrição.



Monitoramento (padrão)

Quando: nenhuma das ações acima foi acionada. O modelo nunca deixa vazio — pelo menos monitora.

4. Riscos Identificados — o que pode acontecer?

O modelo traduz os defeitos em **linguagem de consequência**. Não diz "tem codominância" — diz "pode rachar ao meio de repente".

RISCO	APARECE QUANDO
 Lesão grave ou óbito	Alvo na projeção da copa ou 1× a altura
 Queda de galhos sem aviso	Galhos mortos ou quebrados na copa
 Falha por podridão interna	Deterioração do cerne ou fungo
 Tombamento por falha radicular	Levantamento ou raízes cortadas
 Vetor de queda definido	Ângulo de inclinação no tronco
 Arrasto de vento	Exposição cheio + copa densa
 Ruptura explosiva	Codominância ou casca inclusa
 Tombamento em solo saturado	Solo saturado
 Ocupação constante	Taxa de ocupação = Constante
 Nenhum risco específico	Nenhum dos acima (padrão)

TIPUANA DA RUA AUGUSTA – RECOMENDAÇÕES

Risco **Alto** + falha Iminente →  **Avaliar supressão.**

Também:  Cabo (codominância),  Tratamento solo (compactado + raízes cortadas).

Riscos:  lesão,  galhos caindo,  podridão,  tombamento,  ruptura,  ocupação constante.

Urgência: **30 dias**. Reavaliação: **3 meses**.

CAPÍTULO 11

Caso Completo: a Tipuana da Rua Augusta

"Tudo junto, do primeiro dado ao resultado final"

Acompanhamos a Tipuana ao longo de cada capítulo. Agora vamos ver o caso **inteiro de uma vez**, como o cálculo se desenvolve.

A árvore

ESPÉCIE	ALTURA	DAP	COPA
---------	--------	-----	------

Tipuana tipu

14 m

85 cm

16 m diâmetro

A história

Tipuana de 60 anos numa calçada movimentada de São Paulo. Copa enorme, sombra na rua inteira. Há 3 anos cortaram raízes pra obra de tubulação. Tomografia recente revelou deterioração interna do tronco. O dono do restaurante embaixo reclama que caem galhos secos "toda semana".

Passo 1 — Alvo

CAMPO	VALOR	NOTA
Zona	Projeção da copa (mesas embaixo)	4
Ocupação	Constante (restaurante + pedestres)	4
Mover alvo?	Sim (mesas podem ser afastadas)	-1
Restringir?	Sim	só recomendações

Pior(4, 4) - 1 = **3** → **Impacto: Médio**

Passo 2 — Modificador

FATOR	PONTOS
Corte de raiz	+2
Solo compactado	+1
Chuvas fortes	+1
Vigor baixo	+2
Carga (parcial, normal)	0
Total	6

Passo 3 — Defeitos e falha por parte

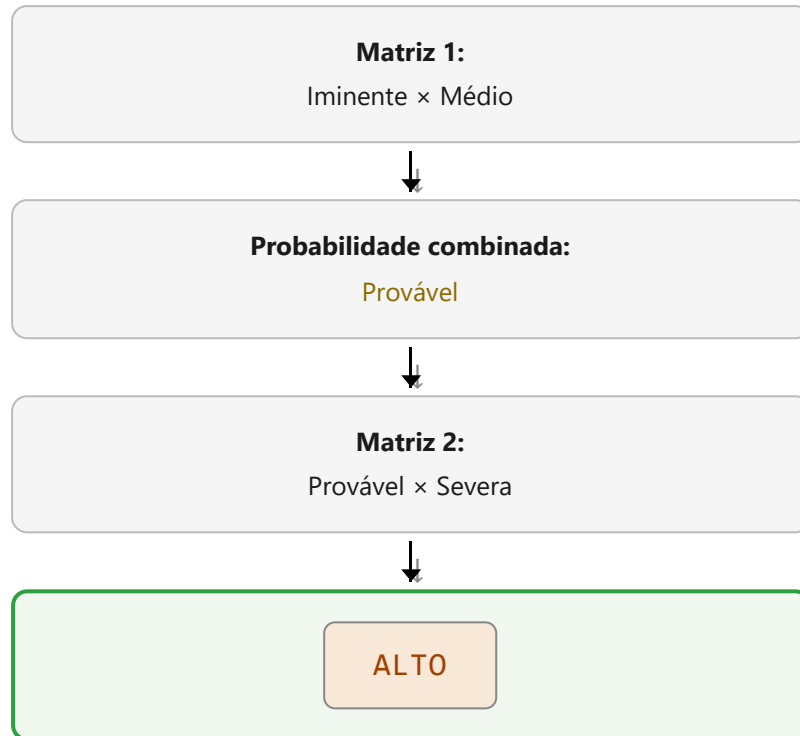
 COPA Galhos mortos (2), quebrado (3), desequilibrada (1), codominância (2) Conta: 3 + 2,5 + (6×0,5=3) = 8,5 Iminente	 TRONCO Det. cerne (4★), cavidade (3), casca morta (2) Conta: FATAL → Iminente direto Iminente	 RAÍZES Raízes cortadas (3), colo soterrado (2), fungo (4) Conta: 4 + 2,5 + (6×0,7≈4) = 10,5 Iminente
--	---	--

Pior falha: Iminente — as três partes empataram. O modelo preserva todas como **partes críticas** e calcula a consequência considerando cada uma delas.

Passo 4 — Consequência

FATOR	PONTOS
Alvo sob a copa (zona)	+3
Deterioração do cerne	+2
Fungo + cavidade (podridão confirmada)	+1
Copa ampla	+1
Total	7 → Severa

Passo 5 — Cruzamento final



O plot twist

💡 Se o técnico tivesse marcado que **não dá** pra mover as mesas → impacto ficaria "Alto" (4) → Matriz 1: Iminente × Alto = "Muito provável" → Matriz 2: Muito provável × Severa = **EXTREMO**. **Um único campo** — "dá pra mover o alvo?" — foi a diferença entre Alto e Extremo.

Resultado final do cálculo



Ações recomendadas



Avaliar supressão

Estrutura comprometida. Risco Alto + falha Iminente — sujeito à validação profissional.



Contenção / cabo

Codominância na copa — alternativa se supressão for negada.



Tratamento de solo

Solo compactado + raízes cortadas.

Riscos identificados

- 🧑 Risco de lesão grave ou óbito — alvo sob a copa
- 💣 Queda de galhos sem aviso — galhos mortos e quebrados
- 🍄 Podridão interna — deterioração do cerne no tronco + cogumelo/fungo na base
- 🪜 Tombamento radicular — raízes cortadas
- ⚡ Ruptura explosiva — codominância na copa
- 👤 Ocupação constante — pessoas o dia todo

O que o técnico escreveria nas Notas

NOTAS DO AVALIADOR

Opção 1: Supressão com replantio de espécie de porte adequado à calçada (ex: Resedá).

Opção 2: Se supressão negada, poda severa + cabo + monitoramento mensal.

"Raízes do lado leste cortadas na obra de tubulação de 2023. Proprietário do restaurante relata queda frequente de galhos. Presença de Ganoderma sp. na base sugere podridão radicular avançada.

Recomendo interdição das mesas sob a copa até resolução."

APÊNDICE A

Referência Técnica

Matrizes, pesos, fórmulas — para profissionais

Fórmula de falha por parte

$\text{pontuação} = \max(\text{pesos}) + 0,5 \times \Sigma(\text{outros pesos}) + \text{round}(\text{modificador} \times \text{fator})$

Fatores: copa = 0,5 · tronco = 0,6 · raízes = 0,7

Faixas: 0 → null · 1 → Improvável · 2-4 → Possível · 5-7 → Provável · 8+ → Iminente

Pisos: peso ≥ 4 → mín. "Provável" · defeito FATAL → "Imminente" direto

Componentes do modificador

FATOR	PONTOS
Vigor = Baixo	+2
Folhagem = Nenhum (morto)	+3
Solo saturado	+2
Solo compactado	+1
Corte de raiz	+2
Ventos fortes	+1
Chuvas fortes	+1
Exposição cheio	+1
Exposição cheio + copa densa	+1
Declive	+1
Declive ≥ 30%	+1
Declive + solo saturado	+1

Tabela de pesos por parte

DEFEITO	COPA	TRONCO	RAÍZES
Copa desequilibrada	1	—	—
Galhos mortos	2	—	—
Galhos quebrados	3	—	—
Galhos estendidos	1	—	—
Rachaduras	3	4	3
Codominância / Ramos codominantes	2	2	—
Junções frágeis	3	—	—
Cavidades / Orifícios	2	3	3
Casca morta/ausente	2	2	—
Textura/cor anormal	—	1	—
Cancro/Galha/Tumor	2	2	—
Cogumelo/fungo	3	4	4
Casca inclusa	3	4	—
Dano/Deterioração alburno	2	2	—
Danos por raios	3	3	—
Deterioração do cerne	4★	4★	—
Exsudação de seiva	—	2	2
Madeira de reação	—	1	1
Ângulo de inclinação	—	3	—
Colo soterrado	—	—	2
Anilhamento do caule	—	—	4★
Morta	—	—	4★

Deterioração (raízes)	—	—	3
Cavidade (raízes)	—	—	3
Raízes cortadas	—	—	3
Levantamento de raízes	—	—	3
Fragilidade do solo	—	—	2

★ = Defeito fatal (direto → "Iminente"). Células em destaque = peso maior que na copa.

Fórmula de impacto

$n = \max(\text{NZONA}[\text{zona}], \text{NOCUP}[\text{ocupação}])$
 se moverAlvo="Sim" → $n = \max(n-1, 1)$
 restringirAcesso não altera o impacto – influencia apenas recomendações
 Mapeamento: 4→Alto · 3→Médio · 2→Baixo · 1→Muito baixo

Fórmula de consequência

$s = \text{pontos_zona} + \text{pontos_defeitos_graves} + \text{pontos_copa}$
 Faixas: 0–1 → Insignificante · 2–3 → Menor · 4–6 → Significante · 7+ → Severa

 Pisos (por parte crítica): tronco/raízes + podridão na própria parte → mín. "Severa"
 Pisos: tronco/raízes sem podridão na própria parte → mín. "Significante"
 Em empate, todas as partes críticas são avaliadas e a maior consequência prevalece

Matriz 1 — Probabilidade combinada (falha × impacto)

	MUITO BAIXO	BAIXO	MÉDIO	ALTO
Iminente	Improvável	Pouco provável	Provável	Muito provável
Provável	Improvável	Improvável	Pouco provável	Provável
Possível	Improvável	Improvável	Improvável	Pouco provável
Improvável	Improvável	Improvável	Improvável	Improvável

Matriz 2 — Risco final (prob. combinada × consequência)

	INSIGNIFICANTE	MENOR	SIGNIFICANTE	SEVERA
Muito provável	Baixo	Médio	Alto	Extremo
Provável	Baixo	Médio	Alto	Alto
Pouco provável	Baixo	Baixo	Médio	Médio
Improvável	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo

Sets especiais

SET	DEFEITOS	EFEITO
FATAL	Deterioração do cerne, Anilhamento do caule, Morta	→ "Iminente" direto
PODRIDÃO	Cogumelo/fungo, Deterioração do cerne, Cavidade, Cavidades/Orifícios	Eleva piso de consequência

Referências normativas

- ISA — TRAQ (Tree Risk Assessment Qualification), 2017
- ABNT NBR 16246-1:2013 — Florestas urbanas — Manejo de árvores, arbustos e outras plantas lenhosas — Parte 1: Poda
- ANSI A300 (2023), Cláusula 13 — Tree Risk Assessment
- Mattheck, C. & Breloer, H. — The Body Language of Trees (VTA method)



Aviso

Este guia explica a lógica do modelo para fins educacionais. Não substitui avaliação presencial por profissional habilitado (Eng. Agrônomo, Eng. Florestal ou Biólogo com ART). Decisões de supressão ou intervenção estrutural devem ser tomadas após vistoria in loco.

Arboricultura Técnica