



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS
CATEGORIA 3

MONITORAMENTO DA FAIXA DE DOMÍNIO FERROVIÁRIA POR IMAGENS
COM SENSORIAMENTO REMOTO E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: UM
MODELO DE MATURIDADE DA FISCALIZAÇÃO REATIVA À GESTÃO
PREDITIVA

RESUMO

Este artigo propõe um modelo de maturidade para o monitoramento da faixa de domínio ferroviária por imagens, integrando sensoriamento remoto — drones, imagens de satélite e câmeras fixas embarcadas em material rodante —, Inteligência Artificial (IA) e Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Diante da ineficiência das inspeções manuais ante a extensão linear da malha e a pressão da ocupação urbana, descreve-se a transição de uma fiscalização reativa para uma gestão contínua e preditiva. A contribuição central é o Modelo de Maturidade do Monitoramento da Faixa de Domínio (M³-FD), que organiza cinco níveis segundo quatro dimensões: arquitetura tecnológica,



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

robustez técnica, governança jurídico-regulatória e desempenho mensurável. A metodologia é validada por uma prova de conceito (POC) realizada em 2026, em um trecho de 100 km de ferrovia no estado de São Paulo, na qual se detectaram, de forma automatizada, invasões, ocupações irregulares, descarte de resíduos e intrusões. Por força de acordo de confidencialidade (NDA) com a operadora, os resultados são reportados de forma qualitativa, mediante sopesamento ordinal do desempenho, sem divulgação de indicadores quantitativos. Discutem-se benefícios, desafios técnicos, custos, exigências regulatórias e aspectos de cibersegurança e privacidade.

Palavras-chave: Faixa de domínio ferroviária. Sensoriamento remoto. Inteligência artificial. Modelo de maturidade. Gestão preditiva.

ABSTRACT

This paper proposes a maturity model for image-based monitoring of the railway right-of-way, integrating remote sensing — drones, satellite imagery and fixed cameras mounted on rolling stock —, Artificial Intelligence (AI) and Geographic Information Systems (GIS). Given the inefficiency of manual inspections in face of the network's linear extent and urban encroachment, the work describes the transition from reactive enforcement to continuous, predictive management. The core contribution is the Right-of-Way Monitoring Maturity Model (M³-FD), which organizes five evolutionary levels along four dimensions: technological architecture, technical robustness, legal-



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

regulatory governance and measurable performance. The methodology is validated through a proof of concept (POC) carried out in 2026 over a 100 km railway stretch in the state of São Paulo, in which invasions, irregular occupations, waste dumping and intrusions were automatically detected. Owing to a non-disclosure agreement (NDA) with the operator, results are reported qualitatively, through an ordinal performance rating, without disclosing quantitative indicators.

Keywords: Railway right-of-way. Remote sensing. Artificial intelligence. Maturity model. Predictive management.

1 INTRODUÇÃO

A faixa de domínio ferroviária constitui área de importância estratégica para a operação e a segurança do transporte sobre trilhos. Sua delimitação e manutenção adequadas são essenciais para garantir a fluidez e a integridade da malha, bem como a segurança das comunidades lindeiras. Este artigo contextualiza a relevância dessa área, diagnostica os desafios de seu monitoramento e propõe um caminho de evolução estruturado para sua gestão.

1.1 Contextualização e importância estratégica

A faixa de domínio é a área de terreno, geralmente estreita em relação ao comprimento, onde se localizam as vias férreas e as instalações a elas associadas. Nela se incluem,



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

ainda, as áreas reservadas à futura expansão da ferrovia. Por natureza, é de uso exclusivo ferroviário: qualquer outra finalidade é incompatível com os riscos inerentes às operações de transporte. Não por acaso, a Lei nº 6.766/1979, que dispõe sobre o parcelamento do solo urbano, estabelece, em seu art. 4º, inciso III, a obrigatoriedade de uma faixa não edificável (*non aedificandi*) de, no mínimo, quinze metros de cada lado da faixa de domínio ferroviária, constituindo instrumento de proteção da segurança operacional e de ordenamento territorial (BRASIL, 1979).

1.2 Da fiscalização reativa à gestão preditiva

A natureza linear e extensa da faixa de domínio, combinada à crescente densidade populacional em seu entorno, torna os métodos tradicionais de monitoramento — sobretudo as inspeções manuais — ineficientes e dispendiosos. Essa ineficiência eleva o risco de acidentes, acelera a degradação patrimonial e dificulta o cumprimento da legislação. Sustenta-se, neste trabalho, que a superação desse quadro não decorre da adoção isolada de uma tecnologia, mas de uma transição organizada de maturidade: da fiscalização reativa, episódica e manual, para uma gestão contínua, automatizada e, por fim, preditiva e regulatoriamente conforme.

1.3 Objetivo e estrutura

O objetivo é apresentar e fundamentar o Modelo de Maturidade do Monitoramento da Faixa de Domínio — doravante M³-FD, sigla que remete às três dimensões nucleares do



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

conceito (Modelo, Maturidade e Monitoramento) aplicadas à Faixa de Domínio. Trata-se de contribuição original deste trabalho, que adapta a lógica consagrada dos modelos de maturidade ao contexto ferroviário. Demonstra-se sua aplicação por meio de uma prova de conceito. O artigo está organizado em diagnóstico do problema e das tecnologias disponíveis; análise dos resultados — na qual se detalham o modelo, suas dimensões e a validação empírica; e conclusões com um roteiro de evolução.

2 DIAGNÓSTICO

2.1 Desafios operacionais e a pressão da urbanização

O crescimento urbano desordenado no entorno das ferrovias intensifica os desafios de gestão da faixa de domínio, gerando passivos históricos de ocupação, aspectos ambientais complexos e imposição de restrições de velocidade em áreas urbanizadas. Entre os gargalos operacionais destacam-se o contorno de cidades, a invasão da faixa por construções e atividades irregulares e o compartilhamento de linhas entre tráfegos de carga e de passageiros. A complexidade é agravada pela multiplicidade de atores — concessionárias, Ministério dos Transportes, ANTT, DNIT, Secretaria de Patrimônio da União, municípios e comunidades lindeiras — e pela ausência de regularização cartorial de muitas áreas (DNIT, 2023). A dimensão do problema é expressiva: segundo o Relatório de Acompanhamento e Acidentes Ferroviários (RAAF) da ANTT, foram registrados mais de 14 mil acidentes ferroviários entre 2004 e 2025, sendo a interferência de terceiros a principal causa isolada — cerca de 35% das ocorrências —,



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

categoria que engloba invasões, intrusões e obstáculos na via; sobressaem, ainda, atropelamentos e abalroamentos, eventos típicos da ocupação irregular da faixa e das passagens em nível, precisamente os riscos que o monitoramento da faixa de domínio busca prevenir (ANTT, 2026).

2.2 O marco legal e o dever de proteção da operadora

A Lei nº 14.273, de 2021, reitera a responsabilidade da operadora ferroviária pela implantação de dispositivos de proteção e segurança ao longo de suas faixas de domínio (BRASIL, 2021). Esse dever alcança a via permanente, o material rodante, os equipamentos e as instalações essenciais à operação, tanto em situações regulares quanto de emergência. A ANTT, por sua vez, regulamenta critérios para a delimitação, a proteção, a ocupação e a utilização da faixa, reforçando a livre utilização pela concessionária e a proteção do patrimônio ferroviário (ANTT, 2015). Esse arcabouço converte o monitoramento em instrumento de cumprimento de um dever legal: mais do que uma escolha tecnológica, a vigilância contínua é meio de conformidade regulatória e de redução de passivos fundiários e operacionais.

2.3 Limitações dos métodos convencionais

As inspeções manuais não acompanham a velocidade da ocupação irregular nem a extensão da malha, dificultando a detecção tempestiva de anomalias e a tomada de decisão. Como resultado, a maior parte do setor opera em estágios iniciais de



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

maturidade, nos quais a resposta é reativa e a evidência, fragmentada. A superação desse limite exige um monitoramento contínuo e em larga escala, que transcende a capacidade de equipes humanas e demanda a incorporação de sensoriamento remoto e inteligência artificial. Esse diagnóstico é coerente com o panorama da visão computacional ferroviária, em que a inspeção de via já se aproxima da adoção em larga escala, ao passo que o monitoramento de segurança e de intrusões — mais próximo do objeto deste trabalho — ainda avança rumo à maturidade plena (ALIF; TUCKER; HUSSAIN, 2026).

2.4 Tecnologias habilitadoras

O sensoriamento remoto permite obter informações sobre a superfície terrestre sem contato físico direto, pela captação e análise da radiação eletromagnética por sensores passivos ou ativos (INPE/DPI, [s.d.]). Os drones — aeronaves remotamente pilotadas — fornecem imagens de alta resolução, muitas vezes em tempo real e a custo menor que o de outras técnicas, com acesso a áreas de difícil alcance. Equipados com câmeras RGB, sensores térmicos e LiDAR, geram ortomosaicos, modelos tridimensionais e modelos digitais de terreno de alta precisão (AEROENGENHARIA, 2023; MAPPA, [s.d.]). As imagens de satélite, por sua vez, oferecem cobertura ampla e dados históricos: detectam mudanças de uso do solo em grandes extensões, com atualização que varia de quinze a trinta dias nos trechos mais sensíveis (ABIFER, 2025).



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

As câmeras fixas embarcadas em material rodante completam o conjunto. Asseguram vigilância contínua durante a operação e, ao capturar trechos extensos, permitem detectar intrusões — uma das principais causas de acidentes graves (ANPTRILHOS, [s.d.]). Sobre todas essas fontes opera a Inteligência Artificial: a visão computacional automatiza a análise de grandes volumes de imagem, identificando e classificando anomalias por meio de redes neurais convolucionais. Entre os modelos consolidados, o YOLO (REDMON et al., 2016) é voltado à detecção em tempo real, com baixa latência, e o Mask R-CNN (HE et al., 2017), à segmentação e à localização precisa das anomalias; arquiteturas mais recentes, baseadas em transformadores, ampliam a análise de cenas complexas, embora a um custo computacional maior (ALIF; TUCKER; HUSSAIN, 2026).

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 O Modelo de Maturidade do Monitoramento da Faixa de Domínio (M³-FD)

A contribuição central deste trabalho é um modelo de maturidade que organiza a evolução do monitoramento em cinco níveis (N0 a N4), avaliados segundo quatro dimensões complementares: (i) arquitetura tecnológica, isto é, as plataformas de aquisição e sua integração; (ii) robustez técnica, relativa à confiabilidade dos sensores e à resiliência operacional; (iii) governança jurídico-regulatória, que abrange conformidade legal, proteção de dados e cibersegurança; e (iv) desempenho, expresso



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

por indicadores mensuráveis. O modelo permite diagnosticar o estágio atual de uma operação e planejar sua evolução de forma estruturada. A Tabela 1 sintetiza os níveis e as dimensões.

Tabela 1 – Modelo de Maturidade do Monitoramento da Faixa de Domínio (M³-FD).

Nível	Arquitetura tecnológica	Robustez técnica	Governança jurídico-regulatória	Desempenho / evidência
N0 – Reativo	Inspeção manual a pé ou de veículo; sem sensoramento.	Dependente de equipe e de condições de campo.	Resposta a denúncias; conformidade reativa.	Cobertura baixa; detecção tardia (meses).
N1 – Assistido	Drone pontual em áreas críticas.	Sensor único (RGB); sensível ao clima.	Registros episódicos; evidência avulsa.	Cobertura localizada; detecção sob demanda.
N2 – Contínuo multiplataforma	Satélite (macro) + drone (meso) + câmera embarcada (micro).	Múltiplas plataformas; análise ainda manual.	Registro georreferenciado das ocorrências.	Cobertura ampla; revisita periódica.
N3 – Automatizado	Acrescenta IA (YOLO/Mask R-CNN) e detecção de mudanças; SIG central.	Detecção automática multiclasse.	Alerta convertido em ordem de serviço, com registro da ocorrência.	Detecção precoce; redução de falsos alarmes.
N4 – Preditivo e conforme	Fusão de sensores (RGB + térmico + LiDAR + SAR).	Operação 24/7 resiliente, sem depender de uma única tecnologia.	Conformidade com a Lei 14.273, a LGPD e a cibersegurança.	Gestão preditiva; indicadores e priorização de risco.

Fonte: elaboração própria.

3.2 Dimensão de arquitetura: o monitoramento hierárquico integrado

A eficácia do monitoramento é amplificada pela complementaridade das plataformas. A arquitetura proposta é hierárquica: os satélites varrem grandes extensões e identificam alterações de uso do solo; os drones executam inspeções de alta resolução nas áreas priorizadas pela triagem orbital; e as câmeras fixas embarcadas asseguram a vigilância contínua durante a operação. Essa combinação de plataformas otimiza recursos — ao



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

concentrar o voo de drones nas zonas de maior risco — e aumenta a eficácia da detecção, superando as limitações de cada tecnologia isolada. A Tabela 2 compara as três plataformas.

Tabela 2 – Comparativo de tecnologias de sensoriamento remoto para monitoramento ferroviário.

Característica	Drones	Imagens de satélite	Câmeras fixas
Plataforma	Aeronave não tripulada	Satélite orbital	Material rodante / infraestrutura
Sensores comuns	RGB, térmico, LiDAR	Óptico multiespectral, SAR	RGB, PTZ, térmica, IR
Resolução espacial	Sub-centimétrica a decimétrica	Métrica a decimétrica	Centimétrica a métrica
Resolução temporal	Sob demanda, diária a semanal	Diária a mensal	Contínua (24/7)
Cobertura	Localizada a regional	Regional a global	Pontual a perimetral
Vantagem-chave	Alta resolução e flexibilidade	Ampla cobertura e dados históricos	Monitoramento contínuo em tempo real

Fonte: elaboração própria.

A frequência de coleta é calibrada pela criticidade da área. Drones cobrem trechos extensos por dia e podem operar de forma semanal a mensal em zonas de alto risco; satélites atualizam trechos sensíveis a cada quinze a trinta dias ou conforme a ausência de cobertura de nuvens; câmeras embarcadas operam continuamente, gerando alertas em tempo real.

3.3 Dimensão de robustez: fusão de sensores e resiliência

A dependência de uma única tecnologia fragiliza o monitoramento, sobretudo diante de condições climáticas adversas. Nuvens, chuva e neblina degradam imagens ópticas de satélite e de drones, limitando a frequência de coleta. A resiliência é alcançada pela diversificação: sensores térmicos operam em baixa visibilidade e à noite, enquanto o



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

radar de abertura sintética (SAR) penetra nuvens e detecta deformações milimétricas em qualquer condição climática. A fusão desses sensores, integrada por IA, sustenta um monitoramento contínuo e confiável — atributo distintivo do nível mais alto de maturidade. A combinação de câmeras RGB com LiDAR eleva a confiabilidade da detecção sob condições adversas, e a interferometria por radar (InSAR) permite acompanhar deformações do solo, útil para antecipar recalques e instabilidades de taludes ao longo da faixa. A robustez a variações de iluminação e clima é reforçada, ainda, pelo pré-processamento das imagens e por técnicas que reduzem a perda de desempenho em cenários não representados no treinamento (ALIF; TUCKER; HUSSAIN, 2026). A Tabela 3 relaciona sensores, anomalias detectáveis e vantagens.

Tabela 3 – Tipos de sensores e aplicações na detecção de anomalias.

Sensor	Princípio	Anomalias detectáveis	Vantagem
RGB	Captura luz visível.	Invasões, ocupações, descarte, construções.	Baixo custo; interpretação visual direta.
Térmico	Mede radiação infravermelha (calor).	Intrusos (dia/noite), focos de incêndio.	Operação 24/7; baixa visibilidade.
LiDAR	Pulsos de laser para modelos 3D.	Alterações topográficas; modelos de terreno.	Alta precisão; detecta pequenas deformações.
SAR	Ondas de rádio, independe de luz.	Deformações estruturais; subsidências.	Opera sob nuvens e chuva.

Fonte: elaboração própria.

3.4 Núcleo de inteligência: IA, SIG e ordens de serviço

No nível automatizado, os dados passam por técnicas de fotogrametria, processamento LiDAR e detecção de mudanças, e são analisados por algoritmos de aprendizado profundo. Redes neurais convolucionais identificam e classificam invasões, edificações



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

irregulares, descarte de resíduos e intrusões. Entre elas, destacam-se o YOLO, voltado à detecção de objetos em tempo real (REDMON et al., 2016), e o Mask R-CNN, voltado à segmentação (HE et al., 2017). As ocorrências são georreferenciadas em ambiente SIG, que centraliza o registro, e integradas aos sistemas de gestão ferroviária, convertendo alertas em ordens de serviço. Sem essa integração, o investimento em sensoriamento e IA resultaria em dados dispersos, subaproveitados para a gestão estratégica da infraestrutura. A exigência de alertas em tempo real favorece, ainda, o processamento junto ao ponto de aquisição — nas câmeras embarcadas, nos drones ou em processadores locais —, que reduz a dependência de infraestrutura centralizada e acelera a resposta; sob restrição de recursos, empregam-se modelos mais leves e aceleradores de hardware para equilibrar exatidão e eficiência. Já no nível preditivo, a integração com sensores de campo e plataformas em nuvem sustenta a análise e a priorização de risco (ALIF; TUCKER; HUSSAIN, 2026).

3.5 Dimensão de governança: conformidade, LGPD e cibersegurança

A maturidade plena pressupõe governança. No plano regulatório, a operação de drones envolve a ANAC, a ANATEL e o DECEA, ao passo que a gestão da faixa de domínio observa as competências da ANTT e do DNIT (ANAC, [s.d.]; ANTT, 2023). No plano da proteção de dados, o uso extensivo de câmeras e sensoriamento remoto suscita questões de privacidade que exigem conformidade com a Lei Geral de Proteção de Dados (BRASIL, 2018), com políticas claras de tratamento e retenção. No plano da segurança, a



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

informatização de infraestrutura crítica amplia a exposição a ataques cibernéticos, demandando proteção de credenciais, de dispositivos e de pontos de acesso remoto. Nesta proposta, conformidade regulatória, privacidade e cibersegurança não são requisitos acessórios, mas condições para alcançar o nível mais elevado de maturidade. Soma-se a esses aspectos a governança dos próprios dados: a ausência de padronização e as indefinições quanto à propriedade dos dados são apontadas como barreiras à adoção do monitoramento contínuo de condição, o que reforça a necessidade de arranjos coordenados de compartilhamento para viabilizar a manutenção preditiva (ALIF; TUCKER; HUSSAIN, 2026).

3.6 Estudo de caso: prova de conceito em trecho de 100 km (São Paulo, 2026)

Em 2026, a metodologia foi validada em uma prova de conceito (POC) conduzida em um trecho de 100 km de ferrovia no estado de São Paulo (ferrovia de carga/mista em região de transição urbano-rural; concessionária, linha e municípios omitidos por confidencialidade). A POC foi executada ao longo de cinco meses (fevereiro a junho de 2026), com o objetivo de aferir a acurácia da detecção automatizada de anomalias e os ganhos operacionais ante o processo de fiscalização convencional. Por força de acordo de confidencialidade (NDA) com a operadora, os indicadores quantitativos de desempenho não podem ser divulgados; em seu lugar, adota-se uma avaliação



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

qualitativa por sopesamento ordinal, que preserva o valor demonstrativo dos resultados sem revelar dados sensíveis.

Configuração da arquitetura. O monitoramento hierárquico combinou imagens de satélite óptico de alta resolução, para a triagem inicial e a detecção de mudanças; drone multirrotor equipado com câmera RGB de 2 a 3 cm/pixel e sensor térmico, cobrindo cerca de 20 km por dia nas áreas priorizadas; e câmeras embarcadas em material rodante operando a 10 fps. A análise empregou os modelos YOLO (v8) para detecção e Mask R-CNN para segmentação, treinados sobre um conjunto de aproximadamente 12.400 imagens anotadas (divisão 70/15/15 entre treino, validação e teste).

Resultados de detecção. A confiabilidade da detecção é expressa de forma qualitativa, por classe de anomalia, na escala ordinal já referida (Muito alta > Alta > Média > Baixa), atribuída por consenso da equipe técnica a partir da verificação em campo (Tabela 4).

Tabela 4 – Avaliação qualitativa da confiabilidade de detecção por classe de anomalia na POC.

Classe de anomalia	Confiabilidade de detecção (sopesamento)
Edificações em faixa <i>non aedificandi</i> (< 15 m)	Alta
Ocupações e invasões da faixa de domínio	Alta
Descarte irregular de resíduos	Média a alta
Intrusão de pessoas (câmera embarcada)	Muito alta

Fonte: elaboração própria. Nota: valores absolutos não divulgados por força de acordo de confidencialidade (NDA).

Resultados operacionais. Os ganhos ante o processo manual são consolidados, na mesma escala qualitativa, na Tabela 5.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Tabela 5 – Sopesamento qualitativo dos ganhos operacionais da POC ante o processo manual.

Dimensão de desempenho	Ganho ante o processo manual (escala ordinal)
Tempestividade da detecção de anomalias	Muito alto (↑↑↑)
Cobertura da malha monitorada	Muito alto (↑↑↑)
Confiabilidade da confirmação em campo	Alto (↑↑)
Redução de falsos alarmes	Alto (↑↑)
Redução do tempo de mapeamento	Muito alto (↑↑↑)
Redução do esforço e da exposição de equipes	Alto (↓↓)
Redução do custo de levantamento	Médio a alto (↑↑)
Foco da inspeção por drone (triagem orbital)	Alto (↑↑)
Antecipação na detecção de novas ocupações	Muito alto (↑↑↑)
Agilidade entre detecção e ordem de serviço	Muito alto (↑↑↑)
Registro documental das ocorrências	Muito alto (↑↑↑)

Fonte: elaboração própria. Nota: escala ordinal Muito alto > Alto > Médio > Baixo; indicadores quantitativos não divulgados por força de acordo de confidencialidade (NDA).

Discussão do caso. Os resultados posicionam a operação validada no Nível 3 (Automatizado) do modelo M³-FD, já com elementos do Nível 4, graças à integração automática entre alerta e ordem de serviço. Duas limitações se destacaram: a indisponibilidade de imagens de satélite em janelas de cobertura de nuvens e a necessidade de novo treinamento do modelo para cenários de vegetação densa. Ambas foram contornadas pela redundância das câmeras embarcadas e do sensor térmico. A evolução rumo ao Nível 4 pressupõe a incorporação plena da fusão SAR e a consolidação das rotinas de governança de dados. A segunda limitação ilustra o desafio mais amplo de generalização dos modelos a cenários não vistos, que pode ser atenuado por aprendizagem por transferência e adaptação de domínio, pelo aproveitamento de grandes volumes de imagens não anotadas e, para classes raras de anomalia, pela geração de dados sintéticos (ALIF; TUCKER; HUSSAIN, 2026).



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

3.7 Discussão: benefícios, desafios, custos e limitações

Os benefícios operacionais e estratégicos abrangem o aumento da eficiência e da agilidade no mapeamento, com prazos menores que os dos métodos terrestres; a melhora da segurança operacional, pela detecção precoce e pela menor exposição de equipes; a cobertura de áreas de difícil acesso; e a geração contínua de dados geoespaciais para o planejamento e a gestão de ativos (OBSERVATÓRIO METROFERRO, 2017). Persistem, contudo, desafios: a acurácia dos modelos varia com as condições visuais e a complexidade do ambiente; a resolução adequada deve ser balanceada com custo e volume de dados; e os algoritmos precisam ser robustos a variações de iluminação e à presença de múltiplos objetos. Os custos envolvem aquisição e operação de drones, licenciamento de imagens e plataformas, e software de SIG — havendo alternativas abertas, como o QGIS, que reduzem o investimento inicial. A análise custo-benefício, todavia, tende a ser favorável quando se consideram a redução de acidentes, a otimização da manutenção e a prevenção de passivos.

4 CONCLUSÕES

O monitoramento da faixa de domínio por imagens, sustentado pela integração entre drones, satélites e câmeras embarcadas e apoiado por IA e SIG, transforma uma atividade reativa em um sistema de gestão contínuo, eficiente e preditivo. O Modelo de Maturidade do Monitoramento da Faixa de Domínio (M³-FD) oferece um instrumento para diagnosticar o estágio atual de uma operação e planejar sua evolução, articulando,



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

em cada nível, arquitetura tecnológica, robustez, governança e desempenho. A prova de conceito conduzida em 2026, em trecho de 100 km no estado de São Paulo, evidenciou a viabilidade técnica e os ganhos operacionais do método proposto. Como roteiro de evolução, recomenda-se:

- N0 → N1: introduzir inspeções por drone nas áreas de maior criticidade, substituindo a resposta exclusivamente reativa;
- N1 → N2: implantar a arquitetura hierárquica, com triagem por satélite e vigilância contínua por câmeras embarcadas;
- N2 → N3: automatizar a detecção com modelos de IA e integrar o SIG aos sistemas de gestão, convertendo alertas em ordens de serviço;
- N3 → N4: consolidar a fusão de sensores (incluindo SAR) e as rotinas de conformidade regulatória, proteção de dados (LGPD) e cibersegurança, alcançando a gestão preditiva.

Recomenda-se, ainda, o desenvolvimento de modelos de IA mais robustos a diferentes condições climáticas e de iluminação, bem como a padronização de protocolos de coleta e análise. São igualmente desejáveis a capacitação continuada das equipes e a realização de estudos de custo-benefício que quantifiquem o retorno sobre o investimento em contextos ferroviários diversos. A consolidação desse caminho evolutivo permitirá às operadoras cumprir, com agilidade e registro documental das ocorrências, o dever legal de proteção da faixa de domínio.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

REFERÊNCIAS

ABIFER. **Satélites aliados a IA monitoram qualidade e irregularidades em ferrovia no Brasil.** 2025. Disponível em: <https://abifer.org.br/en/satelites-aliados-a-ia-monitoram-qualidade-e-irregularidades-em-ferrovia-no-brasil/>. Acesso em: 2 ago. 2025.

AEROENGENHARIA. **Drones nas faixas de domínio:** eficiência e segurança. 2023. Disponível em: <https://aeroengenharia.com/drones-nas-faixas-de-dominio-eficiencia/>. Acesso em: 11 jul. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Orientações para usuários de drones.** [s.d.]. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones/orientacoes_para_usuarios.pdf. Acesso em: 8 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Resolução nº 4.597, de 11 de fevereiro de 2015.** Estabelece regras para a exploração da faixa de domínio das ferrovias (delimitação, proteção, ocupação e utilização). Brasília: ANTT, 2015. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Portaria nº 15, de 27 de outubro de 2023.** Regulamenta o procedimento de correção de irregularidades no âmbito da fiscalização do transporte ferroviário. Brasília: ANTT, 2023. Disponível em: <https://anttlegis.antt.gov.br/>. Acesso em: 5 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Relatório de Acompanhamento e Acidentes Ferroviários (RAAF):** base de registros de acidentes, 2004–2025. Brasília: ANTT, 2026. Disponível em: <https://dados.antt.gov.br/>. Acesso em: 6 jul. 2026.

ALIF, M. A. R.; TUCKER, G.; HUSSAIN, M. Advances in computer vision for comprehensive railway engineering: from track inspection to rolling stock and safety monitoring. **Railway Engineering Science**, 2026. DOI: 10.1007/s40534-026-00434-7.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES DE PASSAGEIROS SOBRE TRILHOS (ANPTRILHOS). **Monitoramento de vídeo em tempo real.** 2018. Disponível em: https://anptrilhos.org.br/wp-content/uploads/2018/09/ANPTRilhos_livro_Monitoramento_Video_tempo_real_web.pdf. Acesso em: 7 ago. 2025.

BRASIL. **Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979.** Dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, 1979.

BRASIL. **Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018.** Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). Brasília: Presidência da República, 2018.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

BRASIL. **Lei nº 14.273, de 23 de dezembro de 2021.** Dispõe sobre o transporte ferroviário. Brasília: Presidência da República, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT).

Reconhecimento e monitoramento da faixa de domínio ferroviária no âmbito das concessões vigentes. 3º Seminário Nacional de Desapropriação e Reassentamento. Brasília: DNIT, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/campanhas-e-eventos/seminarios-de-desapropriacao-e-reassentamento>. Acesso em: 11 jul. 2025.

HE, K. et al. Mask R-CNN. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION (ICCV), 2017, Veneza. **Proceedings [...]**. Veneza: IEEE, 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Divisão de Processamento de Imagens (DPI). **Sensoriamento remoto.** São José dos Campos: INPE, [s.d.]. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

MAPPA. **Sensoriamento remoto com drones:** como funciona? [s.d.]. Disponível em: <https://mappa.ag/blog/sensoriamento-remoto-com-drones/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

OBSERVATÓRIO METROFERRO. **Uso de drones no setor ferroviário reduz custos em até 22%.** 2017. Disponível em: <https://observatoriometroferro.ufsc.br/2017/03/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

REDMON, J. et al. You Only Look Once: unified, real-time object detection. In: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION (CVPR), 2016, Las Vegas. **Proceedings [...]**. Las Vegas: IEEE, 2016.