Industrialização, Digitalização, Desempenho

5º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção e 5º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos

FLORIANÓPOLIS-SC | 20 a 22 de agosto

[1]INOVAÇÃO TECNOLÓGICA NA GESTÃO RODOVIÁRIA: O QUE SE SABE SOBRE OS USOS DO SAR NO MONITORAMENTO DE PAVIMENTOS?

TECHNOLOGICAL INNOVATION IN ROAD MANAGEMENT: WHAT IS KNOWN ABOUT THE USE OF SAR IN PAVEMENT MONITORING?

Oliver Ray Gonzales Zegarra
Universidade de São Paulo | São Paulo, São Paulo | oliver.gonzales@usp.br

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise sobre a aplicação do Radar de Abertura Sintética (SAR) ao mapeamento do estado de transitabilidade viária, oferecendo uma alternativa às inspeções in situ. Além disso, aborda a identificação da cadeia produtiva associada a essa tecnologia como recurso para o planejamento e manutenção viária, o que possibilitaria a redução de custos e prazos inerentes aos métodos de inspeção atuais, ao antecipar eventuais deficiências na qualidade do pavimento. A estrutura do trabalho compreende seis seções: introdução, objetivos, métodos, fundamentação teórica, cadeia produtiva e conclusões. Na introdução, são apresentados dados sobre o grau de deterioração da malha viária na região Norte do Brasil, extraídos da Confederação Nacional de Transportes (CNT). Na sequência, revisitam-se estudos realizados nos Estados Unidos que empregam imagens SAR de banda X, alcançando até 92,6 % de precisão na detecção de irregularidades e rugosidade do pavimento. Posteriormente, expõem-se os princípios operacionais do SAR e sua capacidade de atuação sob quaisquer condições meteorológicas. Em seguida, analisam-se os conceitos básicos e os principais atores da cadeia produtiva — desde os fornecedores de dados até os gestores de infraestrutura — e, por fim, apresentam-se as conclusões derivadas do estudo.

Este articulo presenta un análisis sobre la aplicación del Radar de Apertura Sintética (SAR) para el mapeo del estado de transitabilidad vial, ofreciendo una alternativa a las inspecciones *In Situ*, además aborda la identificación de la cadena de producción alrededor de la aplicación de esta tecnología como una alternativa para la planificación y mantenimiento vial; lo que permitiría la reducción de costos y tiempos asociados a actuales métodos de inspección. Abordando los problemas de calidad de una vía con anticipación. El artículo se desarrolla en seis puntos (introducción, objetivos, métodos, fundamentación, cadena productiva y conclusiones). En la Introducción se presentan información de deterioro vial en la región Norte de Brasil, datos extraídos de la Confederación Nacional de Transportes (CNT). A continuación, se revisan estudios en Estados Unidos que emplean imágenes SAR de banda X, alcanzando hasta un 92,6 % de precisión en la detección de irregularidades y rugosidad. Seguidamente, se exponen los principios operativos del SAR y su capacidad para funcionar bajo cualquier condición meteorológica. Luego, se analizan los conceptos básicos y los actores clave de la cadena productiva—desde proveedores de datos hasta gestores de infraestructura—y, finalmente, se plantean las conclusiones derivadas del estudio.

Palavras-chave: Monitoramento Remoto de Pavimentos, Infraestrutura em Rodovias, Radar de Abertura Sintética SAR, Análise de Cadeia Produtiva, Imagens de Satélite.

ABSTRACT

This article presents an analysis of the application of Synthetic Aperture Radar (SAR) to the remote mapping of roadway condition, offering an alternative to in situ inspections. It also examines the production chain that emerges around this technology as a means to improve road planning and maintenance, thereby reducing the costs and time associated with current inspection methods and enabling the early identification of pavement quality issues. The paper is organized into six sections: Introduction, Objectives, Methods, Theoretical Framework, Production Chain, and Conclusions. The Introduction reviews data on roadway deterioration in Brazil's Northern region, sourced from the National Confederation of Transport (CNT). Next, studies from the United States using X-band SAR imagery are surveyed, achieving up to 92.6 % accuracy in detecting pavement irregularities and roughness. The operational principles of SAR and its ability to function under all weather conditions are then explained. This is followed by an examination of the basic concepts and key actors in the production chain—from data providers to infrastructure managers—and, finally, the study's conclusions are presented.

Keywords: *Remote Pavement Monitoring, Highway Infrastructure, Synthetic Aperture Radar (SAR), Productive Chain Analysis, Satellite Imagery.*

[1]ZEGARRA, O. R. G. Inovação Tecnológica na Gestão Rodoviária: o que se sabe sobre os usos do SAR no Monitoramento de Pavimentos? In: 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 4., 2025, Florianópolis. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2025.

1 INTRODUÇÃO.

A infraestrutura rodoviária brasileira, especialmente na região Norte, enfrenta sérios desafios, com altos índices de deterioração. Segundo dados da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2023), em estados como Amazonas, Acre e Amapá, mais de 90% das vias pavimentadas analisadas apresentam algum tipo de falha estrutural. Esse cenário evidencia a urgência de adoção de tecnologias mais eficazes para o monitoramento das condições dos pavimentos e na fiscalização de obras, como podemos exemplificar através do edital (1/2024) do Tribunal de Contas da União (TCU), que lançou uma convocatória para encontrar soluções inovadoras a fiscalização de obras de calçamento e pavimentação urbana ou em estradas vicinais.

Entre as soluções tecnológicas disponíveis, destaca-se o Radar de Abertura Sintética (SAR), que permite identificar a qualidade da superfície do pavimento com alta precisão (92,6%), fazendo uso da banda X, independentemente das condições meteorológicas ou da luminosidade (Meyer et al., 2020). Além disso, o uso de imagens de satélite tem se mostrado uma alternativa promissora para a gestão da malha rodoviária em países com extensões territoriais amplas e com ausência infraestrutura (Botelho, 2018).

Este estudo tem como objetivo analisar a cadeia produtiva envolvida no monitoramento de pavimentos rodoviários com imagens de satélite, identificando os principais agentes, suas funções e inter-relações. A técnica inovadora proposta consiste na aplicação do Radar de Abertura Sintética (SAR) como ferramenta para detecção precoce de falhas estruturais em rodovias, visando otimizar a gestão da infraestrutura viária com foco em eficiência, sustentabilidade e segurança.

2 OBJETIVO

O objetivo geral deste artigo é analisar a cadeia produtiva e estimar a demanda potencial para o monitoramento de falhas em pavimentos rodoviários no Brasil, utilizando a tecnologia SAR como alternativa às atuais inspeções in situ.

2.1 Objetivos específicos:

- Identificar os principais agentes da cadeia produtiva envolvida no monitoramento com SAR;
- Avaliar o papel e as funções de cada agente;
- Analisar dados da CNT e de políticas públicas para estimar a demanda por esse tipo de serviço;
- Discutir o potencial da tecnologia SAR como ferramenta para políticas sustentáveis e inovadoras.

3 MÉTODO

Este estudo seguiu uma abordagem mista, porque combina técnicas quantitativas (análise estatística de dados CNT) e qualitativas (revisão sistemática da literatura). Iniciando-se por uma revisão bibliográfica sistemática em Google Scholar e MDPI (2010–2023). Empregaram-se termos como “X-Band SAR” e “Remote Pavement Monitoring”. Após triagem de 297 títulos e leitura integral de 10 artigos, extraíram-se em planilha padronizada informações sobre área de estudo, método, desempenho e agentes envolvidos. Destacaram-se dois trabalhos-chave: Meyer et al. (2020) “*Studying the Applicability of X-Band SAR Data to the Network-Scale Mapping of Pavement Roughness on US Roads*” (Remote Sensing 12(9):1507) e Karimzadeh & Matsuoka (2020) e Babu, Baumgartner & Krieger (2022) “*Approaches for Road Surface Roughness Estimation Using Airborne Polarimetric SAR*” (IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,15:3444 – 3462 (2022) que serviram de referência para as etapas seguintes

Revisam-se o estudo de caso no condado de Augusta (Virgínia, EUA), usando imagens GRD X-Band do Cosmo-SkyMed de 2019. Que aplicou-se o modelo semi-empírico calibrado em Meyer et al. (2020) para classificar a rugosidade e validá-lo contra índices IRI oficiais do Departamento de Transportes da Virgínia, avaliando precisão, sensibilidade e especificidade. Paralelamente, foram analisados dados secundários da CNT (2018–2022) — extensão e condição de pavimentos federais e estaduais — por meio de estatísticas descritivas para estimar o potencial de monitoramento remoto. Por fim, a cadeia produtiva foi mapeada a partir

de critérios de capacidades técnicas (fornecedores de imagens, ferramentas de processamento em nuvem, plataformas de armazenamento).

4 FUNDAMENTAÇÃO

Para analisar a caracterização dos elos da cadeia produtiva no monitoramento de falhas em pavimentos rodoviários, é fundamental compreender a tecnologia proposta para essa finalidade. Além disso, é necessário entender como essa tecnologia pode contribuir para a criação de um ambiente sustentável. A compreensão do funcionamento específico para atingir esses objetivos também se mostra crucial para avaliar a eficácia e a eficiência do sistema proposto.

Para analisar a caracterização dos elos da cadeia produtiva no monitoramento de falhas em pavimentos rodoviários, é essencial compreender a tecnologia proposta — neste caso, o Radar de Abertura Sintética (SAR) — e suas aplicações no contexto da infraestrutura viária brasileira. Essa tecnologia, ao permitir a detecção precoce de falhas superficiais com precisão e independência de condições climáticas, apresenta potencial significativo para contribuir com a sustentabilidade e eficiência na gestão rodoviária. Assim, entender o funcionamento do SAR e sua inserção no processo produtivo é fundamental para avaliar a eficácia do sistema proposto, bem como para identificar de que forma essa inovação tecnológica pode fortalecer as práticas de fiscalização, manutenção e planejamento de rodovias, sobretudo em regiões com alta vulnerabilidade estrutural.

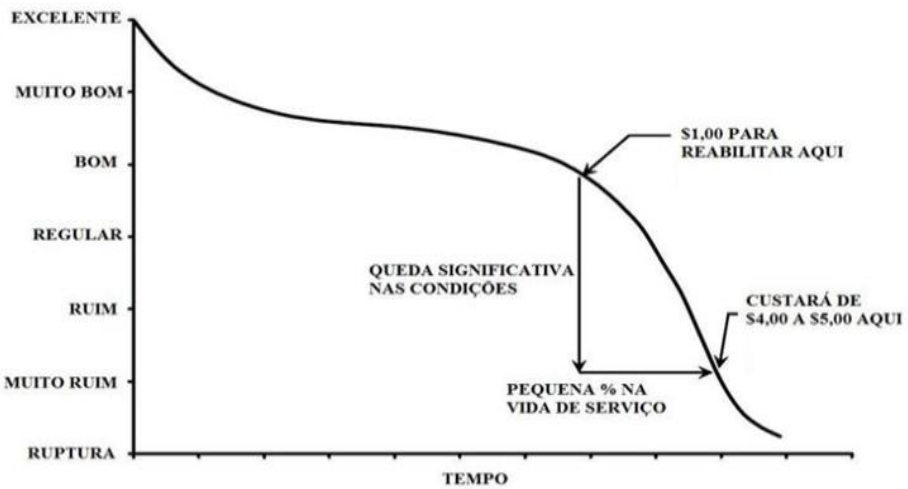
4.1 Tecnologia radar de Abertura sintética – SAR

Atualmente, segundo a pesquisa mais recente da Confederação Nacional do Transporte (CNT), que analisou um total de 111.592 quilômetros de rodovias no Brasil, cerca de 20,3% destas encontram-se em estado ruim, enquanto 5,8% são classificadas como péssimas. Mas o desafio principal fica na zona norte, onde em alguns casos os índices chegam até 100% de vias com algum tipo de problema. (CNT; SEST; SENAT; ITL, 2023).

Além disso, esses dados ressaltam a necessidade de medidas corretivas e estratégias de investimento, especialmente em regiões onde as condições das rodovias são mais precárias (Amazonas 100%; Acre 99,3%; Amapá 94,5%). A promoção de uma infraestrutura rodoviária robusta não apenas impacta positivamente na mobilidade e segurança do transporte, mas contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico dessas áreas.

Essa importância é ainda mais evidente quando se considera que intervenções oportunas em uma via podem prolongar o ciclo de vida de um pavimento, evitando custos elevados de recuperação, que podem chegar a ser até cinco vezes maiores, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Ciclo de vida de uma seção de pavimento.

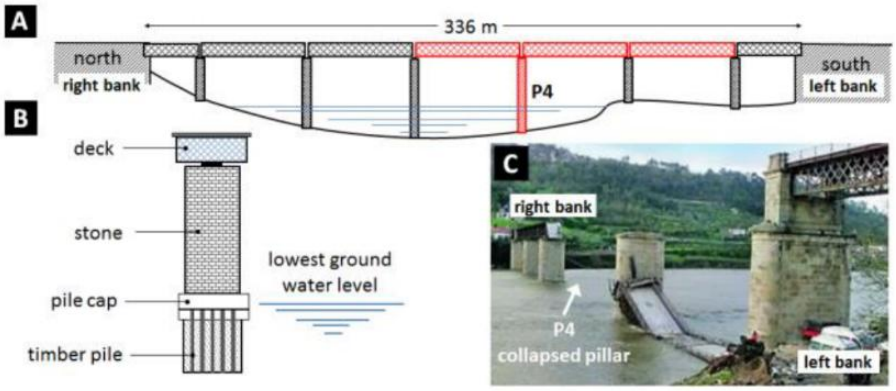


Fonte: Merighi (2017)

Vale ressaltar que é crucial compreender a importância na identificação oportuna de variações nos pavimentos rodoviários. Novas tecnologias podem auxiliar na detecção rápida de problemas, evitando danos mais significativos. Diversos estudos indicam que a manutenção de um pavimento em bom estado reduz os custos de manutenção em quatro a cinco vezes em comparação com pavimentos deteriorados. (FAA apud MERIGHI, 2017, p. 84).

Uma das ferramentas que na atualidade tem sido utilizada com maior frequência para avaliar variações em infraestrutura é a tecnologia SAR. É dessa forma que Guzman et al. (2019) se refere ao trabalho de Sousa y Bastos, que por meio da análise retrospectiva de imagens SAR, identificaram as causas do colapso da ponte Hintze Ribeiro em Portugal (Figura 2).

Figura 2 - Ponte Hintze Ribeiro

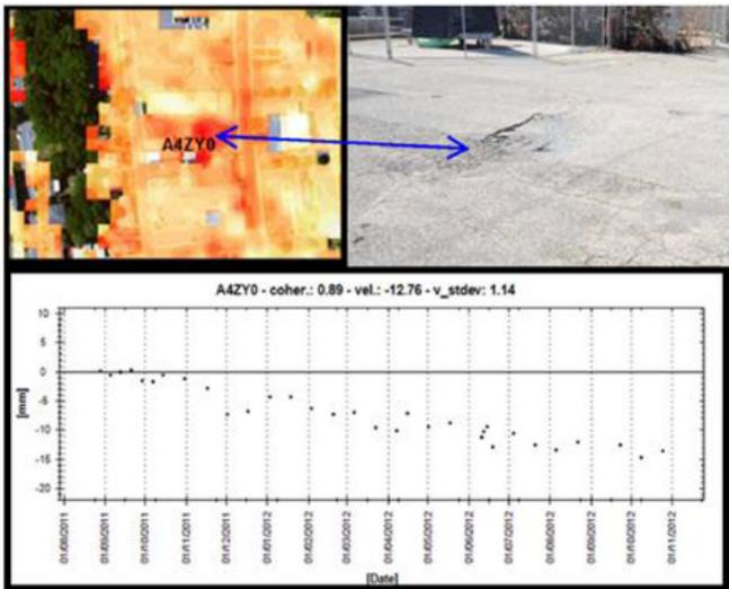


Fonte. Guzman et al. (2019)

O relatório oficial após o acidente apontou que a causa do colapso foi a perda de suporte de sedimentos na base da pilha, somada às fortes correntezas de água no início do ano hidrológico. Os resultados do estudo com imagens SAR indicaram deformações consistentemente superiores ao esperado para o tipo de ponte, com uma tendência sistemática na mesma direção. Assim, o comportamento instável da ponte foi identificado anos antes da catástrofe. (GUZMAN,2019)

No caso de danos no pavimento, foi identificada uma relação entre as diversas respostas de deslocamento em relação às evidências visíveis, conforme se pode apreciar na Figura 3. E assim também que na atualidade o uso da tecnologia SAR já tem uma aplicação direta principalmente na facilidade de detectar subsidência, encostas instáveis, erosão e monitoramento de pontes com forma automatizada.

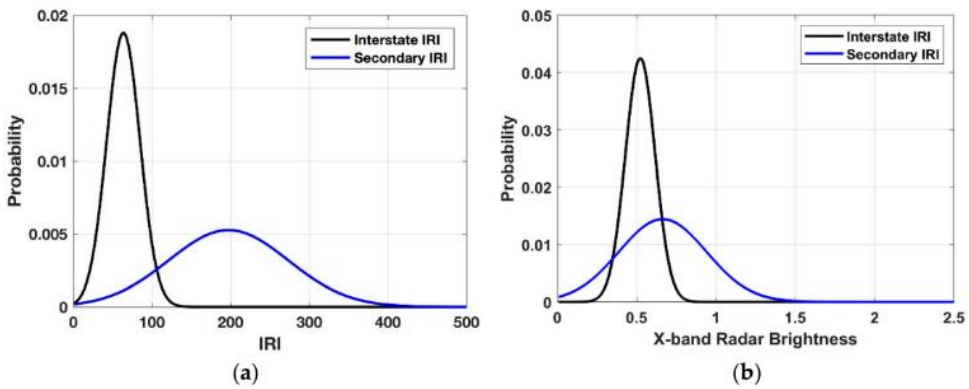
Figura 3 - Pavimento com deslocamento.



Fonte. Guzman et al. (2019)

No estudo de Meyer, Olaniyi, Ajadi e Hoppe (2020), foi realizado o mapeamento da irregularidade de estradas nos Estados Unidos de América usando dados do Radar de Abertura Sintética (SAR) na banda X. O esquema proposto atingiu uma precisão de 92,6%, destacando a eficácia do SAR de banda X para o mapeamento da rugosidade, conforme Figura 4.

Figura 4 - Distribuição estatística dos valores do IRI para rodovias interestaduais (preto) e estradas secundárias (azul) em nossa área de estudo; (b) Distribuição estatística dos valores de brilho de radar pelos mesmos tipos de estradas.



Fonte. Meyer et al. (2020)

A tecnologia SAR funciona emitindo pulsos de micro-ondas em direção à superfície da Terra a partir de uma antena montada em uma plataforma, como um satélite ou uma aeronave. O SAR mede o tempo que esses pulsos levam para serem refletidos de volta à antena, registrando as informações de fase e amplitude. (GUZMAN, 2019)

Além disso, é importante saber que o fundamento da teledetecção ativa por micro-ondas baseia-se na capacidade de medir a reflexão de uma onda eletromagnética (EM) em relação a um objeto ou cena. A capacidade de uma superfície de refletir essa onda eletromagnética é denominada refletividade. Por meio das informações de refletividade de uma cena, é possível desenvolver diversos estudos para: modelos de elevação da superfície terrestre, classificação de terrenos, monitoramento de zonas urbanas e seus limites, entre outros. (ACEVO, 2011, p.97)

As imagens de SAR utilizam ondas de rádio para capturar imagens da superfície terrestre, independentemente das condições meteorológicas ou de iluminação. Essa capacidade torna o SAR extremamente útil para monitoramento em áreas com cobertura de nuvens ou durante a noite, além de fornecer imagens detalhadas da topografia e da estrutura do terreno. Fujita et al. (2015, p. 32) afirmam que "o SAR oferece vantagens significativas para o mapeamento de áreas de difícil acesso, como regiões com cobertura densa de nuvens". O uso de radar permite a coleta de dados valiosos em locais onde outras tecnologias de sensoriamento remoto seriam limitadas.

Outro estudo de caso que demonstra a viabilidade do uso de SAR para monitoramento é o modelo semiempírico proposto por Babu et al. (2022), que estima a rugosidade superficial do pavimento (k_s) utilizando apenas a retrodispersão σ^o de um SAR de banda X e o ângulo de incidência. Ele parte da equação de Dubois, descarta o efeito da umidade e inverte essa relação para obter k_s.

$$\sigma_{pq}{}^o = \delta\ (\cos\theta)^{\beta} \cdot ks^{\varepsilon \cdot \sin\theta}$$

Donde

- σpq^o: Coeficiente de retrodispersão normalizado ("*sigma-nought*") para a combinação de polarizações p,q (por exemplo, HH ou VV).
- θ: Ângulo de incidência do feixe de radar em relação à superfície terrestre.
- δ: Fator de escala ou calibração empírica, ajustado para igualar a magnitude geral de σ^o à rugosidade.
- β: Expoente que modula a dependência da retrodispersão em função do cosseno do ângulo de incidência.
- k_s: Parâmetro de rugosidade superficial (normalmente o desvio padrão das alturas da amostra de pavimento, em mm).
- ε: Expoente que descreve como a rugosidade k_s influencia o sinal de retrodispersão
- sinθ: Termo que incorpora a variação da área efetivamente iluminada pela antena em função do ângulo de incidência.

Os parâmetros δ, β e ε são calibrados empiricamente por meio de regressão contra medições de rugosidade "in situ" e ajustados por mínimos quadrados com dados coletados em campo, sendo posteriormente validados em um conjunto independente. O modelo incorpora filtragem de ruído e mascaramento baseado em sigma-nought e Relação Sinal-Ruído (SNR), alcançando um Erro Quadrático Médio (RMSE) de 0,23 mm no conjunto de treinamento e 0,37 mm na validação, superando métodos anteriores e apresentando alta escalabilidade e aplicabilidade operacional.

Segundo Earth Engine Team (2024), as principais características do SAR estão dadas pelo:

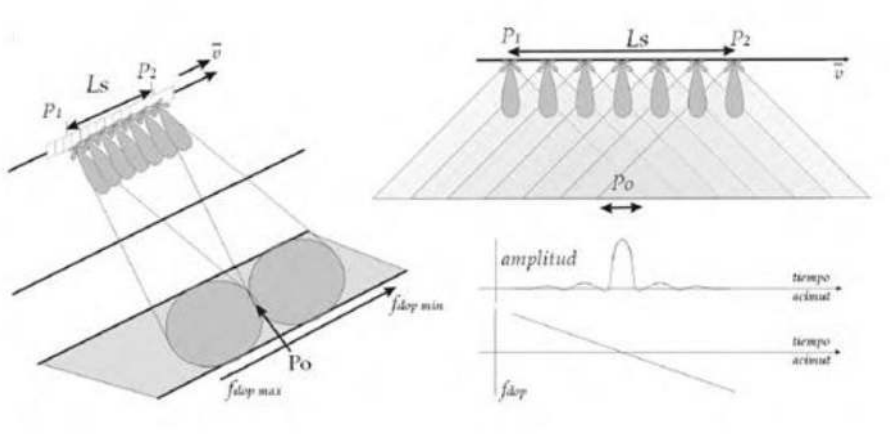
SAR é um sensor ativo, que transmite radiação de micro-ondas e recebe a radiação refletida. Em contraste, os sensores ópticos são passivos e capturam a radiação refletida do Sol em faixas específicas do espectro visível e infravermelho.

O SAR opera de um ângulo lateral, enquanto os sensores ópticos estão geralmente orientados verticalmente (nadir).

A radiação do SAR é caracterizada por sua coerência, o que possibilita medições precisas de fase e amplitude das ondas refletidas, além de permitir o uso de técnicas de polarização. Por outro lado, os sensores ópticos não apresentam essa coerência, pois suas radiações refletem uma ampla gama de comprimentos de onda e possuem fases aleatórias.

Além disso, os ângulos de incidência são um parâmetro essencial a considerar em uma análise. Eles representam o ângulo entre a direção da iluminação do radar e o plano da superfície terrestre. Esse ângulo varia de acordo com a altura do sensor e influencia diretamente a intensidade da imagem. Por essa razão, a geometria da imagem muda de um ponto para outro ao longo da direção do alcance (PODEST, 2024).

Figura 5 - Princípio de funcionamento do SAR



Fonte. Meyer et al. (2020)

5 CADEIA PRODUTIVA DO MONITORAMENTO

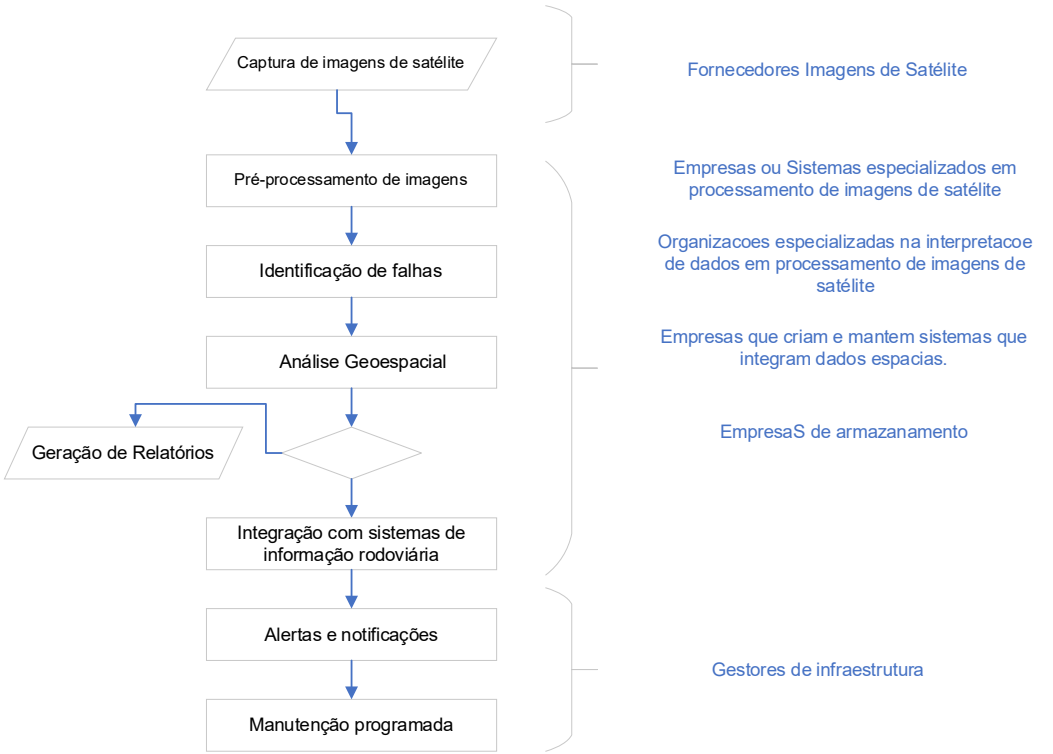
A cadeia para o monitoramento de falhas em pavimentos rodoviários com imagens SAR requer uma abordagem integrada, combinando métodos modernos (análise de dados geoespaciais e técnicas avançadas de processamento de imagem) com métodos convencionais.

Na Figura 6, apresenta-se o fluxograma dos processos para o monitoramento de pavimentos asfálticos utilizando imagens satelitais elaborado pelo autor. Cada processo é associado a um agente específico da cadeia produtiva envolvida. A seguir, são identificados os agentes para cada etapa do fluxo: (a) fornecedores de imagens de satélite; (b) empresas especializadas em processamento de imagens de satélite; (c) organizações especializadas na interpretação de dados; (d) empresas que criam e mantem sistemas que integram dados geoespaciais; (e) empresas de armazenamento e/ ou processamento; (f) gestão de infraestrutura rodoviária.

Neste artigo, foca-se na identificação dos principais agentes da cadeia produtiva, destacando aqueles que exercem maior impacto no monitoramento de falhas em pavimentos rodoviários flexíveis. E assim, que os principais elos identificados. Primero, os fornecedores de dados satelitais, que capturam e distribuim imagens brutas. Em seguida, se tem empresas de pré-processamento realizam filtragem de speckle, calibração radiométrica e geração de produtos brutos. Esses produtos são então consumidos por organizações de interpretação de dados (consultorias e centros de pesquisa), que aplicam modelos semi-empíricos para derivar mapas de rugosidade e detecção de anomalias. A etapa seguinte envolve desenvolvedores de sistemas de integração, responsáveis por incorporar esses resultados em plataformas GIS e ERPs de gestão viária. Paralelamente, provedores de armazenamento em nuvem asseguram disponibilidade, escalabilidade e segurança dos bancos de dados. Finalmente, gestores de infraestrutura (ANTT, DNIT, concessionárias) utilizam relatórios e alertas automatizados para programar manutenções preventivas e corretivas, fechando o ciclo de feedback com novas coletas SAR.

A interação entre esses elos ocorre por meio de APIs padronizadas e pipelines automatizados. Por exemplo, ao detectar trechos críticos, as ferramentas de interpretação disparam rotinas de integração direta com sistemas de gestão de ativos, permitindo que o DNIT acione serviços de manutenção em horas, em vez de semanas. Essa fluidez operacional diminui custos de mobilização in situ e amplia a capacidade preditiva da governança rodoviária. Em nível institucional, a transparência dos processos — desde a aquisição do SAR até a programação de reparos — fortalece a confiabilidade dos contratos de concessão e cria um ciclo contínuo de otimização: cada intervenção gera dados de campo que alimentam novos ajustes nos modelos SAR.

Figura 6 - Diagrama de fluxo dos processos para o monitoramento de pavimento asfáltico com a identificação dos agentes da cadeia produtiva



Fonte: O autor

5.1 Fornecedores de Imagens Satelitais

Dentre os principais fornecedores de imagens SAR, encontram-se a ESA (Agência Espacial Europeia) - com a constelação de satélites Sentinel e COSMO - SkyMed da Agência espacial Italiana.

O SENTINEL-1 é uma missão de radar de imagem que fornece imagens contínuas em todas as condições meteorológicas, dia e noite, na banda C. Sua constelação oferece alta confiabilidade, tempo de revisita aprimorado e ampla cobertura geográfica para aplicações operacionais em monitoramento marinho, terrestre e serviços de emergência. Potencialmente, o SENTINEL-1 cobre todas as massas de terra globais, zonas costeiras e rotas marítimas europeias em alta resolução, além de realizar varreduras regulares nos oceanos globais. Com modos operativos específicos, como Stripmap, Interferometric Wide Swath, Extra Wide Swath e Wave, a ESA distribui produtos de dados, incluindo níveis brutos, SLC processados, dados GRD e dados Ocean Level-2, proporcionando informações geofísicas oceânicas. (ESA, 2023)

No caso de COSMO - SkyMed o SAR-2000 utiliza uma antena elétrica orientável para direcionar a energia transmitida em feixes estreitos, determinando a resolução e cobertura. Com modos restritos militarmente de alta resolução e opções mais amplamente disponíveis de resolução inferior, o SAR-2000 opera na banda X, cobrindo áreas extensas com resolução variável, sendo vital para aplicações militares e civis. (ESA, 2023)

5.2 Empresas ou sistemas especializados em processamento de imagens de satélite

Uma das ferramentas que na atualmente trabalham o processamento de imagens satelitais SAR é o Google Earthe Engine (GEE), desenvolvida pela empresa Google LLC. O GEE é uma plataforma experimental em constante evolução, totalmente acessível, que inclui um catálogo de dados públicos, infraestrutura computacional, APIs (Interface de Programação de Aplicações) geoespaciais e um servidor de aplicações interativas (GOOGLE DEVELOPERS, 2021).

Além disso, o GEE também proporciona a capacidade de aplicar operações analíticas e sintéticas a conjuntos de dados geoespaciais, permitindo a detecção, medição, identificação, caracterização ou interpretação de condições geoespaciais (Gorelick et al., 2017)

PolSARPro, é uma ferramenta para processamento de dados polarimétricos SAR de vários satélites, incluindo Envisat, SENTINEL-1, ALOS-1, ALOS-2, COSMO-SkyMed e outros. Oferece ferramentas para importação, filtragem, decomposição e calibração de dados SAR, além de simulação com o PolSARproSim. A versão 6.0 interage com programas externos como G.I.M.P, ImageMagick, Google Earth, S.R.T.M, ASTER e ESA Sentinel-1 Toolbox, proporcionando recursos avançados para análise e visualização geoespacial. (MORALES, 2017)

Já o Sentinel-1 Toolbox (S1TBX) que é uma coleção de ferramentas para processamento, leitura e escrita de produtos de dados, e uma aplicação de visualização e análise que suporta o amplo arquivo de dados das missões SAR da ESA, incluindo SENTINEL-1, ERS-1 e 2 e ENVISAT, bem como dados SAR de terceiros de ALOS PALSAR, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed e RADARSAT-2. As diversas ferramentas de processamento podem ser executadas independentemente pela linha de comando e integradas à interface gráfica do usuário. A Toolbox inclui ferramentas para calibração, filtragem, coregistro, ortorretificação, mosaico, conversão de dados, polarimetria e interferometria. Ambas ferramentas desenvolvidas pela Agencia Espacial Europa (MORALES, 2017)

5.3 Empresas de armazenamento

No cenário dos provedores de armazenamento, destacam-se Google, Amazon e Microsoft, por meio de seus serviços Cloud Storage, Amazon S3 e Microsoft Azure, respectivamente. Esses serviços oferecem escalabilidade, permitindo aos clientes armazenar e proteger grandes volumes de dados. São amplamente utilizados em casos como data lakes, aplicações móveis, backup, arquivamento, dispositivos IoT (Internet das coisas) e análises de big data. Esses provedores são fundamentais para empresas de diversos tamanhos e setores, proporcionando flexibilidade e segurança na gestão de dados em um ambiente de nuvem confiável. (AMAZON, 2023)

5.4 Empresas ou sistemas especializados em processamento de imagens de satélite

A 3vGeomatics, empresa canadense com sede em Vancouver e filial em Belo Horizonte, Brasil, se destaca na produção de milhares de relatórios anuais usando a tecnologia de radar de abertura sintética interferométrica (InSAR), atendendo a uma ampla base de clientes em mais de 40 países. Desde sua fundação em 2007, a 3vGeomatics tem como missão tornar o acesso ao InSAR mais acessível para diversas aplicações, focando em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar a automação e escalabilidade. Com presença global, equipe qualificada e compromisso com a inovação, a empresa é líder no monitoramento por sensoriamento remoto, atuando em setores como mineração, petróleo e gás, contribuindo para avanços em segurança, infraestrutura e preservação ambiental. O produto Datastream de deslocamento oferece monitoramento flexível para atender às necessidades específicas de cada projeto, considerando resolução, precisão de detecção, topografia, clima, vegetação e cobertura do solo. (GEOMATICS,2024)

5.5 Gestores de infraestrutura rodoviária

Identificam-se como gestores governamentais entidades como a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), responsável por regular as atividades de exploração da infraestrutura rodoviária federal e fiscalizar a execução dos contratos de concessão das rodovias federais entregues à iniciativa privada. No caso das rodovias federais pedagiadas, destaca-se o Departamento Nacional de Infraestrutura em Transporte (DNIT), com uma extensão total de aproximadamente 9.700 quilômetros. Já as rodovias estaduais, independentemente de serem pedagiadas ou não, estão sob a responsabilidade dos respectivos estados (ANTT, 2024).

No entanto, também são identificadas as entidades que congregam as empresas concessionárias de rodovias, como a Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias (ABCR). Trata-se de uma entidade privada sem fins lucrativos, criada em 1996, que atualmente representa 52 empresas, abrangendo 18 mil quilômetros associados e movimentando R$ 236 bilhões (ABCR, 2024).

Além disso, destaca-se a atuação do CNT (Confederação Nacional do Transporte), criada em 1954, como representação máxima do transporte brasileiro. A instituição congrega 28 federações, 5 sindicatos nacionais e 22 entidades associadas, atuando de maneira ativa para fortalecer e promover avanços estratégicos e sustentáveis no setor (CNT, 2024).

As empresas concessionárias, tais como AB Concessões, Arteris, CCR, Ecorodovias, Invepar e Monte, administram aproximadamente 18 mil quilômetros de vias sob concessão, correspondendo a uma parcela significativa do total de 75,8 mil quilômetros, conforme dados do Ministério dos Transportes (2019).

5.6 Determinação da demanda

Para a determinação da demanda para o monitoramento é essencial considerar que, de acordo com o Quadro 1, que apresenta o Estado Geral por região dos 111.502 km de rodovias avaliados pelo CNT, 67,5% dessas vias apresentam algum tipo de problema no pavimento, classificado como Regular, Ruim ou Péssimo. Isso implica que aproximadamente 75.300 quilômetros requerem uma atenção especial e um monitoramento mais intensivo.

No Quadro 1, é possível observar o estado geral dos quilômetros analisados de vias federais e estaduais pavimentadas por região. Destaca-se que a região Norte é a mais afetada, com 71,40% das vias apresentando problemas, resultando em um custo significativo de acidentes, estimado em cerca de R$13,4 bilhões. Esses dados indicam uma evidente necessidade de melhorias nas diversas vias.

Quadro 1 - Estado Geral por região dos 111.502 km de rodovias

REGIAO	Estado Geral		Pavimento		
	Algum tipo de Problema	Ótima ou boa	Apresenta problemas	Condição satisfatória	Pavimento totalmente destruído
BRASIL	**67,5%**	**32,5%**	**56,8%**	**43,2%**	**0,6%**
NORTE	80,1%	19,9%	71,4%	28,6%	2,0%
NORDESTE	74,9%	25,1%	53,3%	46,7%	0,6%
SUDESTE	56,7%	43,3%	54,3%	45,7%	0,4%
SUL	67,7%	32,3%	56,1%	43,9%	0,2%
CENTRO-OESTE	63,6%	36,4%	56,5%	43,5%	0,2%
DIST. FEDERAL	54,4%	45,6%	37,0%	63,0%	0,0%

Fonte: Confederação Nacional do Transporte (CNT,2023)

Adicionalmente, é crucial levar em conta a nova Política Pública de concessões rodoviárias, que busca estabelecer contratos sustentáveis incorporando inovações tecnológicas e promovendo a sustentabilidade ambiental. Este enfoque abre espaço para um crescimento potencial na demanda, especialmente por parte das novas concessionárias, que devem aderir a esses princípios orientadores em seus contratos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cenário atual das rodovias brasileiras, especialmente na região Norte, exemplifica a urgência de aprimorar o monitoramento e a manutenção de pavimentos. Segundo a pesquisa recente da Confederação Nacional do Transporte (CNT), cerca de 20,3% das rodovias no Brasil estão em estado ruim, sendo 5,8% classificadas como péssimas. Na região Norte, esse problema atinge proporções mais críticas, chegando a 100% em algumas áreas, como Amazonas, Acre e Amapá.

A tecnologia de Radar de Abertura Sintética (SAR) surge como uma ferramenta promissora para o monitoramento eficaz de pavimentos rodoviários. Estudos, como o de Guzman et al. (2019), demonstram a capacidade do SAR na identificação precoce de problemas, como no caso dos pavimentos rodoviários do estudo de Meyer, Olaniyi, Ajadi e Hoppe (2020), destaca-se pela eficácia na detecção de irregularidades. A precisão alcançada, cerca de 92,6%, ressalta a utilidade do SAR na avaliação da rugosidade, crucial para intervenções oportunas.

A tecnologia SAR pode constituir-se como uma alternativa às inspeções in situ, proporcionando maior eficiência em termos de custo e tempo e, assim, aprimorando a gestão rodoviária.

A cadeia produtiva do monitoramento, conforme apresentada, requer uma abordagem integrada. Desde fornecedores de imagens satelitais, como a ESA e COSMO - SkyMed, até empresas especializadas em

processamento, como Google Earth Engine, PolSARPro e Sentinel-1 Toolbox, cada elo desempenha um papel crucial.

No âmbito do armazenamento, gigantes como Google, Amazon e Microsoft oferecem serviços de Cloud Storage, garantindo escalabilidade e segurança. Empresas como a 3vGeomatics, especializada em InSAR, desempenham papel vital na produção de relatórios de alta qualidade, como o produto Datastream de deslocamento.

Em relação à demanda, pode-se observar que o comportamento nos próximos anos apresenta uma tendência de crescimento.

REFERÊNCIAS

3V GEOMATIC – What is InSaR. Disponivel em: https://3vgeomatics.com/solutions/what-is-insar/ Acesso 10 abr. 2025

Acevo, R. Sistemas de detecção remota ativos e passivos embarcados em sistemas aéreos não tripulados para a monitorização da terra.2011. 229f. Tese (Doutorado em sistemas de teledetecção). Departamento de Teoría de la señal y comunicaciones, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona. 2011.

AMAZON. Armazenamento de objetos para empresas de todos os tamanhos. 2024. Disponivel em:https://cloud.google.com/storage. Acesso em: 20 mar, 2025

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres. O que é a ANTT. 2024. Disponível em: https://portal.antt.gov.br/resultado/-/asset_publisher/m2By5inRuGGs/content/id/497800. Acceso em: 10 ene. 2025

Babu, A.; Baumgartner, S. V.; Krieger, G. Approaches for road surface roughness estimation using airborne polarimetric SAR. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, v. 15, p. 3444–3462, 2022. DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3170073.

Botelho, L.V.C. Utilização de Imagens de Satélites em Auditoria de Obras Rodoviárias. 2018. 68f. Monografia de especialização do curso de pós-graduação - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

CNT – Confederação Nacional de Transporte. Confederação Nacional de Transporte. Pesquisa CNT de rodovias 2023. Brasília, 2023. 204 p. Disponível em: https://www.cnt.org.br/pesquisas. Acesso em: 12 dic. 2024

ESA – European Space Agency. PolSARpro. Disponivel em: https://earth.esa.int/eogateway/tools/polsarpro. Accesso em: 10 ene. 2024

Guzman et al. Análise do Potencial da Tecnologia Satelital InSAR para o Monitoramento da Infraestrutura Rodoviária. México: Secretaría De Comunicaciones Y Transportes Instituto Mexicano Del Transporte. 2019. 59p (Publicação Técnica No. 593). Disponível em: https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=502&IdBoletin=183. Acesso em: 10 dic. 2024

Meyer, Olaniyi, Ajadi e Hoppe. Studying the Applicability of X-Band SAR Data to the Network-Scale Mapping of Pavement Roughness on US Roads. Remote Sensing, v12. DOI 10.3390/rs12091507. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/12/9/1507. Acesso em: 10 mar. 2025

Merighi, L.F. Avaliação funcional de pavimentos asfálticos aeroportuários com a finalidade de estabelecer metas para sua manutenção. 2017. 208f. Tese (mestre em ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo,2017. DOI 10.11606/D.3.2017.tde-04082017-150101. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-04082017-150101/pt-br.php. Acesso em: 20 mar. 2025

Morales, A. Programas gratuitos para trabajar con imágenes de satélite. c2012. Disponível em : https://mappinggis.com/2017/12/programas-gratuitos-para-trabajar-con-imagenes-de-satelite/ Aceso em 20 mar. 2025