

4º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BASE DE DADOS GEORREFERENCIADA PARA
ANÁLISE E PREVENÇÃO DE DESCARRILAMENTOS**

1. INTRODUÇÃO

O somatório dos diversos custos relacionados à implantação de um sistema ferroviário é muito elevado e necessita de um valor significativo de investimentos. Devido a este fator, torna-se imprescindível que os administradores da infraestrutura ferroviária reúnam esforços com o intuito de manter a linha férrea em boas condições a fim de se evitar e/ou ao menos minimizar a ocorrência de acidentes que provoquem a necessidade de obras de reparação de grandes avarias, além de perdas do material rodante e risco à carga transportada ou à vida de pessoas, rentabilizando assim o capital investido nas vias e nos veículos (BRINA, 1998).

Além disto, a ocorrência de acidentes desfavorece a imagem da empresa frente a prestação de um serviço de qualidade. Cabe ressaltar ainda que há um impacto negativo nas taxas de produtividade e índices de segurança impostos pelo órgão regulador de transporte no Brasil e previstos nos contratos de concessão que as empresas necessitam seguir, podendo gerar

multas e crescentes prejuízos (BRANCO e FERREIRA, 2002).

Em relação aos acidentes ferroviários, este trabalho abordará em especial aqueles em que há ocorrência de descarrilamentos, um tipo bem comum de evento que acontece quando uma ou mais rodas de um veículo ferroviário são forçadas, por falha humana ou por defeitos do material rodante e da superestrutura, a deixar a superfície de rolamento situada no topo do trilho e tocar o chão, podendo causar muitos prejuízos (IWNICKI, 2006).

Ainda, apesar dos avanços tecnológicos em métodos e instrumentos utilizados na prevenção de problemas e para o controle da qualidade da linha férrea, atualmente o número de acidentes com descarrilamentos noticiados no setor ferroviário é significativo. Nos Estados Unidos, por exemplo, este número chega a uma média de mais de 1.300 casos por ano e que tem se mantido constante ao longo do tempo (Tabela 1).

Tabela 1: Acidentes ferroviários nos Estados Unidos

Ano	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Total de Acidentes	13.396	12.958	11.247	11.630	11.513	11.077	11.627	12.137	11.601
Acidentes com Descarrilamentos	1.934	1.789	1.370	1.333	1.467	1.294	1.310	1.320	1.345
% de Descarrilamentos	14%	14%	12%	11%	13%	12%	11%	11%	12%

Fonte: FRA - Federal Railroad Administration (2016)

No Brasil, os dados oficiais sobre acidentes ferroviários não especificam a quantidade de descarrilamentos verificados no país, porém acredita-se que estes números, em termos de taxas relacionadas a número de veículos e extensão da malha ferroviária, sejam semelhantes aos observados nos Estados Unidos, uma vez que as taxas de acidentes entre os dois países se assemelham, como visto na tabela 2 a seguir.

Diante deste cenário, nota-se que compreender os mecanismos e as causas de acidentes, principalmente com relação à ocorrência de descarrilamentos, visando a sua prevenção,

torna-se um estudo de extrema importância. Desta forma, preveni-los trará benefícios na segurança dos usuários, na eficiência do sistema de transporte, no investimento e na receita de uma empresa ferroviária.

Tabela 2: Taxas de acidentes ferroviários nos Estados Unidos e no Brasil

Ano	Taxa de Acidentes Estados Unidos*	Taxa de Acidentes Brasil*
2007	17,56	14,00
2008	16,75	15,00
2009	16,71	16,00
2010	16,32	15,00

* Acidentes milhão de trem. km

Fonte: ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres; FRA

Percebe-se também que a análise dos fatores envolvidos em descarrilamentos relacionando possíveis causas e efeitos, mapeando pontos críticos e buscando soluções que venham a minimizar este tipo de problema torna-se de suma relevância.

Neste sentido, vale a pena destacar a utilidade e aplicabilidade de ferramentas computacionais capazes de associar informações de acidentes ferroviários aos locais de ocorrência, como os sistemas de informação geográfica (SIG).

Um SIG é um sistema de informação construído especialmente para armazenar, analisar e manipular dados geográficos, ou seja, dados que representam objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente e indispensável para tratá-los (CÂMARA et al., 1996).

No caso de um estudo sobre acidentes envolvendo descarrilamentos em ferrovias, por exemplo, a utilização do SIG facilita a integração de dados coletados de fontes heterogêneas,

de forma transparente e conjunta ao usuário final, possibilitando a este correlacionar agentes causadores de acidentes associando a áreas de interesse.

Logo, o objetivo principal desta pesquisa foi analisar espacialmente a ocorrência de acidentes ferroviários envolvendo descarrilamentos, verificando principalmente a interação entre fatores físicos e climatológicos com as causas destes acidentes registrados no período de 2010 a 2016 na malha ferroviária administrada pela MRS Logística S.A.

Além disto, foram apontados quais os principais parâmetros para se examinar a ocorrência deste tipo de evento, assim como os mesmos podem formar uma base de dados para aplicação em análises espaciais utilizando o sistema de informação geográfica Quantum GIS (QGIS).

2. DESCARRILAMENTOS

O processo de descarrilamento de veículos ferroviários, no qual a roda perde a sustentação provida pelo trilho, é ocasionado por várias razões tais como obstruções e problemas na via, trilhos ou eixos quebrados, choques durante manobras, excesso de velocidade e também vandalismo (HONG, 2011).

Quando um descarrilamento tem como causa raiz falhas mecânicas dos veículos ou trilhos partidos, por exemplo, a sua identificação é mais fácil e a investigação se concentrará no projeto, material, fabricação, manutenção e inspeção do eixo juntamente com a mecânica da fratura (quando ocasionado pelo veículo) e no perfil e averiguação de defeitos nos trilhos (IRICEN, 2007).

Porém, há casos em que fica menos evidente qual foi a origem de um descarrilamento e quais foram as causas que também contribuíram para este acontecimento, sendo

observados principalmente quando os frisos da roda sobem nos trilhos ou quando acontecem descarrilamentos nos aparelhos de mudança de via.

Para compreender o mecanismo deste tipo de evento, é preciso primeiro entender a relação entre a carga vertical aplicada pela roda na superfície dos trilhos, originada pelo peso do veículo, e a resultante das forças laterais provocadas pelo contato do friso da roda com o trilho e quando há um deslocamento transversal durante a movimentação do veículo, visto principalmente em curvas.

Para isto, referencia-se, no presente trabalho, o estudo publicado M. J. Nadal que, mesmo tendo sido publicado em 1896, é até os dias de hoje um marco de referência na literatura ferroviária sobre os mecanismos de descarrilamento de uma roda. O autor apresenta um termo conhecido como Critério de Nadal baseado no equilíbrio físico dos esforços atuantes no contato das rodas do veículo com os trilhos.

Este critério (NADAL, 1907) apresenta a relação crítica (L/V) entre carga lateral (L) e a pressão vertical (V), no ponto de contato em que a roda é guiada pelo trilho externo de uma curva, a qual depende do ângulo de inclinação da face ativa do friso (condicionado ao desgaste superficial) e do coeficiente de atrito (função do grau de lubrificação) entre as partes, conforme indicado na figura 1. A partir dessa relação, constata-se que quanto melhor a lubrificação e menor o desgaste das rodas e também dos trilhos, melhor a segurança para evitar o acontecimento de um descarrilamento.

Se o valor observado alcançar o patamar crítico indicado pela expressão, poderá ocorrer a subida do friso no trilho e, conseqüentemente, o descarrilamento. Quanto maior o valor de (L/V), maior é a probabilidade deste evento acontecer.

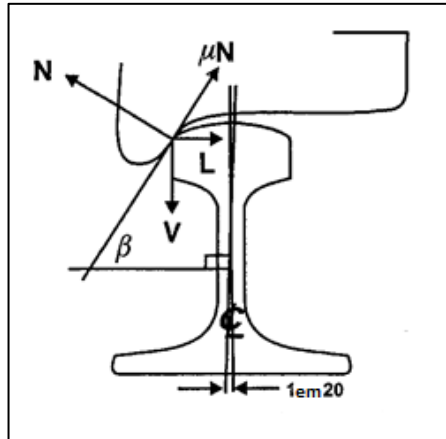


Figura 1: Forças que atuam no contato roda trilho

Fonte: Nadal (1908)

$$\frac{L}{V} = \frac{\tan \beta - \mu}{1 + \mu \tan \beta} \quad (1)$$

Onde:

L = força lateral no friso da roda;

V = carga vertical na roda;

β = ângulo do ponto de contato entre roda e trilho;

μ = coeficiente de atrito entre o lado interno do trilho e o friso da roda.

Analisando a figura 1 representada acima, observa-se que a carga vertical terá uma componente atuando para baixo, buscando evitar a subida de roda, enquanto a força lateral gerará uma componente atuando para cima e contribuindo diretamente para a escalada da roda. Se a componente relativa à (V) superar aquela gerada pela (L), então a roda permanecerá apoiada no boleto do trilho (BRANCO E FERREIRA, 2002).

Se durante o movimento da roda há um incremento à carga lateral, ocasionado principalmente por defeitos de alinhamento da linha, como forte variação de flechas, de bitola e brusca variação de raio de curvatura, poderá ocorrer um descarrilamento por subida de roda. Neste caso, o surgimento de forças laterais de arrasto e flangeamento induzem a roda a "escalar" o topo do trilho percorrendo uma distância curta e posteriormente a perder o contato da superfície para fora da via (Figura 2).

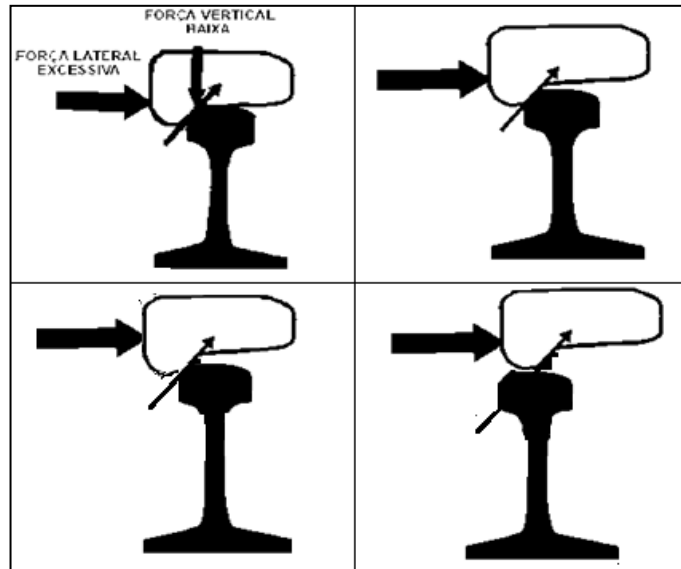


Figura 2: Mecanismo de um descarrilamento

Fonte: Vidon (2017)

Porém, quando as forças laterais permanecem constantes durante o movimento, devido a defeitos como desnivelamento da linha por irregularidades de superelevação, empeno e torção de linha, ocorre uma súbita redução de força vertical e, neste ponto, provavelmente ocorrerá um descarrilamento por elevação de roda, em que o friso da roda "pula" para superfície do trilho e percorre uma distância maior sobre ele até saltar para fora.

Outro tipo comum de descarrilamento provocado por uma carga lateral excessiva é o devido ao quadramento do trilho. Tal fator está associado também, ao desgaste da superfície do trilho que influencia diretamente o torque resistente que atua contrariamente à ação do torque causado pela força lateral, tendo como referência o ponto mais externo da base do trilho (patim).

Além do excesso de carga lateral, com a diminuição da área de contato da superfície do boleto (devido ao desgaste), a distância entendida como "braço de alavanca" diminui e consequentemente o momento resistente é menor. Com uma elevada força lateral atuante, o momento de tombamento supera a resistência e faz com que o trilho quadre (Figura 3).

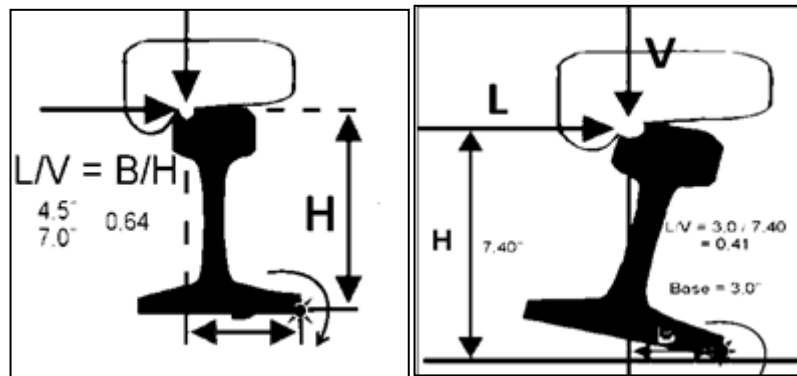


Figura 3: Quadramento de Trilho

Fonte: Vidon (2017)

Em condições comuns de circulação, a carga vertical da roda é substancialmente maior que a carga lateral e a relação (L/V) observada nas rodas na maior parte dos casos apresentará valores naturalmente baixos, em geral inferiores a 0,4.

Porém, uma linha pode apresentar um bom nível de lubrificação, além dos veículos e a condução do trem estarem regulares, mas se a via não estiver geométrica e estruturalmente aceitável, e se num caso pior houver uma associação de fatores de não conformidade atuando em conjunto, acontecerão desbalanceamentos que conduzirão a relação (L/V) a níveis um pouco superiores ao normal, provocando, assim, um descarrilamento.

Há ainda que se considerar a situação da bitola (distância entre os dois trilhos e define a base do rolamento dos veículos em uma ferrovia), parâmetro de maior importância na definição das características geométricas da via (LIMA, 1998). Ela pode variar repentinamente de forma que a cota local seja maior que o eixo de apoio das rodas e com isto estas podem vir a cair para dentro da via .

Em todos os tipos supracitados, é importante definir, primeiramente, o mecanismo de descarrilamento e, em seguida, reunir sistematicamente indícios e informações para determinar os fatores causadores para saber quais os principais parâmetros deverão ser analisados no local onde o evento ocorreu. Isto, para que estes parâmetros possam ser

confrontados e analisada a interação entre eles.

De acordo com informações da FRA, os principais fatores de inadequações que causam os descarrilamentos, por ordem decrescente de frequência de causas, são os seguintes:

1. Geometria da via: defeitos geométricos tais como nivelamento transversal e longitudinal, bitola, empeno e torção de via;
2. Formação e condução do trem: itinerários, frequências, tamanhos e perfis de carregamentos e tração (heterogeneidade do material rodante), prioridade e divisão das cargas;
3. Manobra inadequada;
4. Subleito;
5. Aparelho de mudança e transposição de via: desgaste na ponta das agulhas, irregularidades nas cotas de salva guarda;
6. Trilho (inclusive junta): condição seca e fortemente áspera observada por esmerilamento recente, trincas, fraturas e trilho partido;
7. Posicionamento ou amarração da carga, causando desbalanceamento;
8. Roda e eixo (rodeiro);
9. Excesso de velocidade;
10. Condições ambientais diversas (vento, neve, inundação, etc);

Em se tratando de problemas com a via permanente, destaca-se o estado de conservação dos dispositivos de drenagem que, se inadequados, tendem a favorecer o acúmulo e retenção de água no subleito. Assim, a depender das características do solo como granulometria e o modo de arranjo das partículas (estrutura), há um impacto significativo em sua capacidade de carga e um favorecimento a deformações permanentes.

À medida em que o teor de umidade do solo aumenta do valor ótimo previsto em projeto, este apresenta uma deficiência em seu comportamento resiliente (capacidade de deformação elástica recuperável) sob a ação de cargas repetidas. Desta forma, o pavimento e o seu subleito não conseguem suportar o nível de carregamento imposto pelo tráfego das

locomotivas e composições e podem proporcionar à superestrutura deformações permanentes críticas que comprometam a trafegabilidade da via (DARIVA, 2016).

Também, quando o lastro está contaminado (apresenta uma grande quantidade de finos) e a drenagem é inadequada, ocorre uma perda de elasticidade do material granular (diminuindo a resposta resiliente da via), recalques diferenciais, deformações permanentes no subleito e consequentes alterações indesejadas na geometria da linha (CORDEIRO *et al.*, 2015).

A partir do que foi apontado até aqui, observa-se que diversos são os fatores que condicionam o acontecimento de descarrilamentos, os quais também podem estar combinados interagindo entre si, tornando a atividade de controle e prevenção mais difícil. Devido a isto, sistemas de suporte e decisão devem ser adotados para que seja possível planejar as atividades de manutenção e mitigação além de determinar pontos em que o controle da degradação da via deve estar mais focada.

Uma forma de analisar espacialmente as vias é através de aplicação de sistemas que quantifiquem o estado de degradação da superestrutura através de índices de qualidade para determinados trechos, calculados a partir da medição destes diversos parâmetros tais como dados geométricos da via e perfil dos trilhos.

No caso do estudo da ocorrência de descarrilamentos, estes índices por trecho podem ser comparados com informações sobre locais com número significativo de incidência destes eventos e com outros dados da região como topografia, clima e tipo de solo da região, permitindo assim que os administradores possam perceber como alguns efeitos podem estar correlacionados com as características locais.

É neste sentido de cruzar informações nominais e quantificadas de ferrovias e veículos

ferroviários com dados georreferenciados de locais de acontecimento de descarrilamentos que este trabalho se insere.

3. QUANTUM GIS

O Quantum GIS (QGIS) é uma ferramenta computacional com uma interface simples de se trabalhar e que pode ser completamente customizada de acordo com necessidades do usuário, além de ser um *software* com código aberto (grátis) licenciado segundo a Licença Pública Geral GNU. O QGIS é um projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo).

Em comparação a outros programas pagos, o QGIS, apesar de não possuir uma capacidade de análise de dados muito vasta, possibilita a instalação de complementos (*plugins*) que disponibilizam ao usuário uma série de funcionalidades em constante crescimento pois muitos pesquisadores têm contribuído para o aperfeiçoamento desta ferramenta.

Assim como a maior parte dos sistemas de informação geográfica, o *software* utiliza três tipos de camadas (*layers*) para compor uma base de dados para associar informações não espaciais que descrevem o evento, como nome e tipo de variável, características espaciais localizadas e características temporais (data de coleta e validade), os quais estão descritos na tabela 3, a seguir.

Tabela 3: Tipos de camadas da base de dados do QUANTUM GIS

Camada	Descrição	Exemplos
Ponto	Coordenadas únicas pontuais para um determinado parâmetro.	Ocorrências de descarrilamentos, início e fim de trechos, sinalização.
Linha	Conjunto de pontos interligados sequencialmente.	Linha férrea, trechos em curva e com superelevação, túneis.
Polígono	Áreas delimitadas por linhas.	Pátios e estações, zonas urbanas.

Fonte: INCRA (2001)

Um objeto geográfico qualquer somente será localizado se for ser descrito em relação a outros objetos cujas posições sejam previamente conhecidas, ou se tiver sua localização determinada em uma rede coerente de coordenadas. Com isto, observa-se que a primeira preocupação ao iniciar um trabalho no QGIS é saber se todos os dados estão coerentes e qual será o Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) adotado no projeto, informação esta requisitada pelo programa sempre que se insere alguma nova camada.

Quando se dispõe de um sistema de coordenadas fixas, define-se a localização de qualquer ponto na superfície terrestre. Os sistemas de coordenadas dividem-se em dois grandes grupos: geográficas ou terrestres e planas ou cartesianas. Como o primeiro considera desvios angulares a partir do centro da Terra, não é um sistema conveniente para aplicações em que se buscam distâncias ou áreas. Para estes casos, utiliza-se então o sistema de coordenadas planas (Camara et al., 1996).

Outra preocupação referente às informações inseridas no QGIS diz respeito à forma de aquisição de todos os dados e o nível de precisão adequado para cada parâmetro. No setor ferroviário, a localização dos aparelhos de mudança de via necessita de um grau de exatidão maior que um marco inicial ou final de um trecho, como exemplo, devido ao valor econômico e por ser um ponto crítico da via.

Neste sentido, é necessário definir inicialmente qual será a fonte de aquisição destes dados, se por sensoriamento remoto por GPS (*Global Positioning System*), sistema baseado em satélites que provê a medição de latitude, longitude e altura em qualquer ponto da Terra; por Câmaras Fotográficas Aero-Transportadas (utilizadas como componente gráfico, servindo como fundo sobre o qual outras informações são apresentadas, ou como fonte de

dados); ou importando informações de outras ferramentas computacionais como o *Google Earth*.

Por fim, antes de dar início às análises no programa, é preciso ter em vista qual será a classe de aplicações da investigação para que se utilizem escalas corretas, fontes de dados adequadas e, certamente, as funções de análise.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Manipulação de Dados no Quantum GIS

Para realizar a manipulação de dados no QGIS foram inseridas no *software* as informações sobre acontecimentos de descarrilamentos, criando-se inicialmente uma nova camada para agrupar todas as informações. Como estes acontecimentos acontecem geralmente num local específico, o tipo de base de dados mais apropriado foi pontual (tipo ponto).

Atentou-se, inicialmente, para a opção do SRC da camada que deve ser condizente com as coordenadas dos dados de projeto iniciais, tais como a localização espacial da linha férrea, os limites municipais, zonas urbanas, etc., para que, ao cruzar as informações, estas não venham a se desencontrar espacialmente.

É de extrema importância que sejam conhecidas as coordenadas dos pontos onde estes acidentes aconteceram, devendo haver então um campo específico para a latitude e longitude. O QGIS não permite adicionar diretamente um campo para o preenchimento com as coordenadas do ponto na tabela de atributos de um elemento. Para isso, pode-se:

a) Instalar o complemento *NumericalDigitize* que permite acrescentar pontos com as coordenadas desejadas. Após instalado, basta apenas clicar no ícone referente a este

comando, selecionar a camada desejada e editar a coordenada dos pontos de acordo com o número de identificação do campo "id".

b) Importar os dados de um arquivo já existente, por exemplo, de uma planilha do Excel. Para isto, é preciso que o arquivo em formato ".csv" e que a formatação do texto (delimitadores dos numerais) estejam de acordo com a configuração exigida pelo QGIS. Vale a pena ressaltar também que, ao importar arquivos deste formato no *software*, eles só serão editados em suas tabelas de atributos se primeiramente eles forem salvos como uma nova camada no QGIS.

De posse da base de dados da camada contendo todas as informações referentes aos acidentes envolvendo descarrilamentos constatados e notificados, sucedeu-se à análise destes pontos no conjunto geral de dados espaciais disponível.

Para o estudo de acidentes no setor ferroviário, a base de dados pode conter informações sobre a ferrovia, estações e pátios, limites municipais, zoneamento urbano, zonas climáticas, etc, as quais deverão ser fornecidas por empresas administradoras das vias, obtidos por órgãos governamentais e até mesmo requerido junto às prefeituras das cidades. Assim, foram inseridos no programa todos os arquivos vetoriais da área analisada disponíveis.

A utilização de ferramentas online como imagens do *Google Earth* e de outros servidores de imagem e mapas (*Bing, Yahoo*) também pode ser vantajoso para quem for analisar espacialmente os acontecimentos de descarrilamentos, uma vez que este recurso é simples de se manusear. Atenta-se porém para a compatibilização dos dados (SRC dos objetos).

No QGIS é o complemento *OpenLayers* que permite a visualização das imagens citadas. Para utilizá-lo certifique-se que está ativado o "Habilita transformação SRC *on the fly*" nas propriedades do projeto e que a internet está funcionando e tenha em vista que o SRC será

automaticamente modificado para *Google Mercator*, logo para voltar ao SRC original do seu projeto, altere-o nas propriedades do projeto.

Abertos os arquivos, percebeu-se que estes assim que carregados apresentaram uma cor única, o que nem sempre facilita a visualização e a compreensão do tema referente aquele mapa. Desejou-se então que a apresentação do mapa fosse modificada realçando as características mais relevantes para associar os pontos de ocorrência de descarrilamentos com possíveis fatores atenuantes.

O QGIS não permite a criação de mapas temáticos a partir da tabela de atributos. Para criar um mapa temático baseado em um único atributo nominalmente ou através de uma classificação quantificada, foi preciso acessar as propriedades da camada e personalizar o atributo desejado de forma que ele viesse a se destacar na apresentação da camada.

Para a investigação deste trabalho, por exemplo, buscou-se diferenciar por cores na camada dos limites municipais as zonas urbanas ou não para que, ao olhar os pontos onde ocorreram os acidentes, o analista inicialmente já saiba se uma das causas diretas pode ter sido uma obstrução na via provocada por terceiros devido a localização estar dentro de uma área urbana ou em áreas onde houve uma invasão da faixa de domínio da ferrovia.

Apesar das camadas terem apresentado vários objetos, houve a possibilidade de salvar apenas um ou alguns elementos em uma nova camada agrupando feições com características semelhantes. Como exemplo, agrupar trechos de municípios que compartilhem mesmas características geológicas e dados da via que não se diferem (largura da bitola, tipo de dormente, características do lastro, tipo de trilho, entre outros). Para agrupar feições com mesmas características, foi utilizada a opção do complemento *FTOOLS*.

4.2. Estudo de Caso

Para exemplificar a aplicação da ferramenta foi considerado o estudo de caso baseado nos dados de descarrilamento da empresa MRS Logística S.A. (MRS), prestadora de serviços de transporte ferroviário no Brasil.

4.2.1. Malha Ferroviária da MRS

A MRS é uma empresa de logística de transporte ferroviário que explora a concessão de cerca de 1.643 km de ferrovias nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo. É responsável por transportar quase 33% da carga transportada por trens no país e 20% da carga de exportação (ANTT, 2017).

A malha ferroviária sob responsabilidade da MRS, utilizada neste estudo, possui disposição geográfica importante por ligar regiões produtoras a grandes centros de consumo bem como aos portos do Rio de Janeiro, Sepetiba, Itaguaí e Santos, o que traduz o peso estratégico de uma ferrovia em pleno estado de funcionamento. A seguir, a Figura 4 apresenta o mapa que possui a distribuição da malha no espaço geográfico da região Sudeste.

4.2.2. Dados Pluviométricos

A rede ferroviária sob responsabilidade da MRS está numa região possui clima tropical na baixada fluminense, clima subtropical na região metropolitana de São Paulo e clima tropical de altitude nas regiões interiores próximas ao maciço da Mantiqueira e adjacências. A variedade do clima provoca variação nos regimes de chuvas no decorrer do ano, porém o regime médio anual mantém-se com poucas alterações.

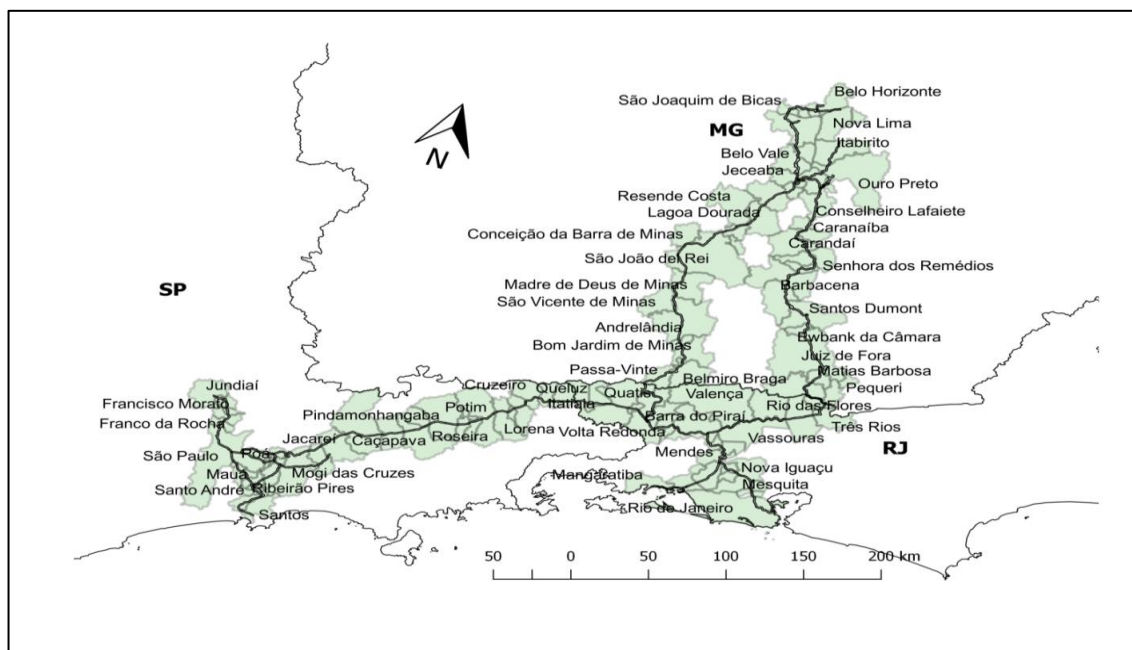


Figura 4: Malha Ferroviária da MRS Logística S.A.

Nesse sentido, com o auxílio do software de Sistema de Informações Geográficas, Quantum GIS (QGIS), foi possível obter um mapa de calor das médias pluviométricas dos municípios por onde passa a via férrea da MRS (Figura 5). A partir deste mapa, foram identificadas as regiões cujo o regime de chuvas é maior, sendo este dado utilizado em posterior análise.

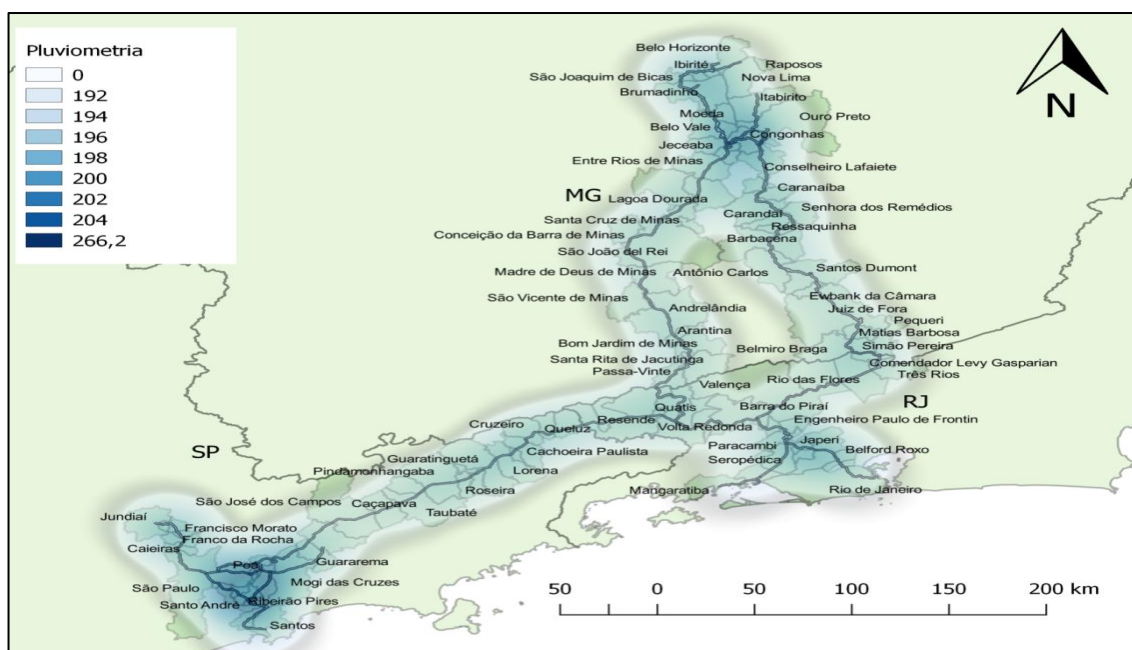


Figura 5: Média Pluviométrica Anual (mm/m^2) dos Municípios das Vias da MRS

Fonte: Adaptado de INPE (2016)

4.2.3. Tipos De Solos

O uso de mapas pedológicos em estudos preliminares para obras viárias é útil para a identificação do tipo de solo de ocorrência na área de interesse, esta análise inicial permite ao pesquisador o reconhecimento da região de estudo, a estimativa do comportamento do solo em obras viárias a fim de correlacionar com as classificações geotécnicas (DARIVA, 2016).

Segundo Marangon (2004), a classificação pedológica é baseada nas características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas dos solos e utiliza horizontes diagnósticos para identificá-los. As classes dos solos são determinadas conforme o processo pedológico que atuou na sua gênese, tendo como o principal critério de classificação e mapeamento do solo a diferenciação vertical entre os horizontes de um perfil de solo.

A região Sudeste possui relevo modelado sobre rochas sedimentares. Caracterizando-se pela presença de colinas com topos aplainados, tabulares, e declividade dominante entre 10 e 20%, predominando os Latossolos Vermelho-Amarelo e Vermelho-Escuro de baixa fertilidade natural, distróficos ou álicos, formados a partir de arenito sobre basalto assentado sobre arenito, o que lhe confere fragilidade potencial para erosão hídrica de muito baixa a muito alta.

Os solos que suportam a via férrea da MRS são os seguintes:

- a. Planossolo Háplico: Solo intermediário com horizonte adensado e permeabilidade lenta ou muito lenta, de cor acinzentada a escura. São do tipo hidromórficos - solos de terrenos baixos, apresentando excesso de umidade e lençol freático alto;
- b. Latossolo Vermelho-Amarelo: Solo em avançado estágio de intemperização, variando de bem drenados, de drenagem moderada a até imperfeitamente drenados, de cor pálida.

Estrutura, em geral, muito pequena, granular com aspecto de maciça porosa (teores de argila desde 15% até 80%);

- c. Gleissolo Sálico, solos que se encontram permanente ou periodicamente saturados por água, caracterizando-se por serem mal drenados em condições naturais, de cores variando de acinzentada, azulada ou esverdeada (consistência areno-argilosa ou argilo-arenosa);
- d. Cambissolo Háptico, solos com grande heterogeneidade do material de origem, cuja drenagem pode variar de fortemente a imperfeitamente drenados, de cor bruna, bruna-amarelada a vermelho escuro;
- e. Argissolo Vermelho-Amarelo, solo que apresenta alto incremento no teor de argila, variando de forte a imperfeitamente drenados, cores entre vermelho e alaranjado.

Estes solos são representativos da região Sudeste, embora metade da região esteja assentada sobre rochas do complexo cristalino, onde o relevo é bastante movimentado com presença de montanhas. A partir de dados georreferenciados da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e com a utilização do QGIS, foi possível plotar o mapa dos solos sob a malha ferroviária da MRS, apresentado na Figura 6, mais a frente.

Ademais, para uma caracterização geotécnica adequada da capacidade do solo em prover uma boa sustentação para a via férrea, além dos conhecimentos provenientes da Pedologia, é necessário conhecer os parâmetros de classificação e comportamento destes solos decorrentes da atuação do processo geológico típico das regiões tropicais úmidas, denominados solos tropicais, além do módulo resiliente destes. Porém, estas informações de subleito não são conhecidas amplamente para todo o território abrangido pela malha ferroviária estudada.

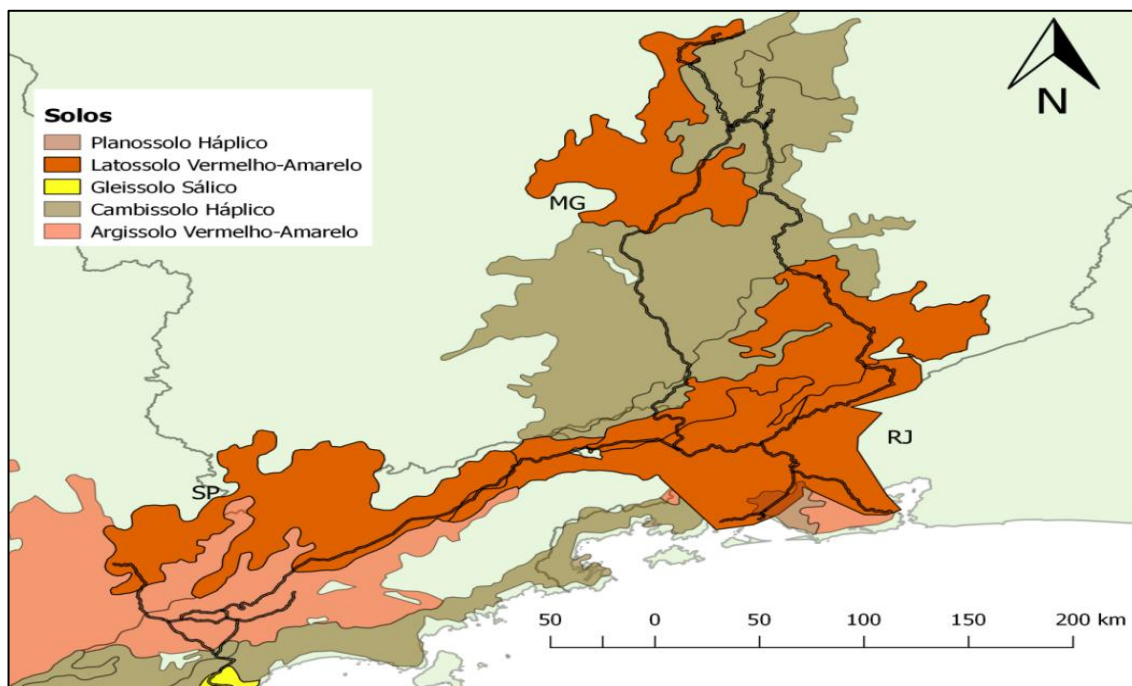


Figura 6: Solos das Vias da MRS

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2017)

A partir de alguns estudos como o de Dariva (2016), foi possível ter acesso a informações sobre as principais ocorrências das classes pedológicas, as características segundo o sistema de classificação dos solos tropicais e o comportamento resiliente do subleito de alguns segmentos de via férrea que atravessa os estados do Rio de Janeiro e de Minas Gerais para assim ter um conhecimento maior sobre esta região.

Foram coletadas 21 amostras indeformadas dos solos que compõem o subleito desta via, distribuídas ao longo aproximadamente 800 km de extensão. As informações sobre o módulo resiliente delas foram inseridas no Quantum GIS e estão expostas na figura 7.

O módulo resiliente pode produzir uma indicação da condição ou qualidade do material (FHWA, 1993). Logo, os maiores valores encontrados estão ligados a camadas mais rígidas e com melhor capacidade de carga em relação as de menor índice.

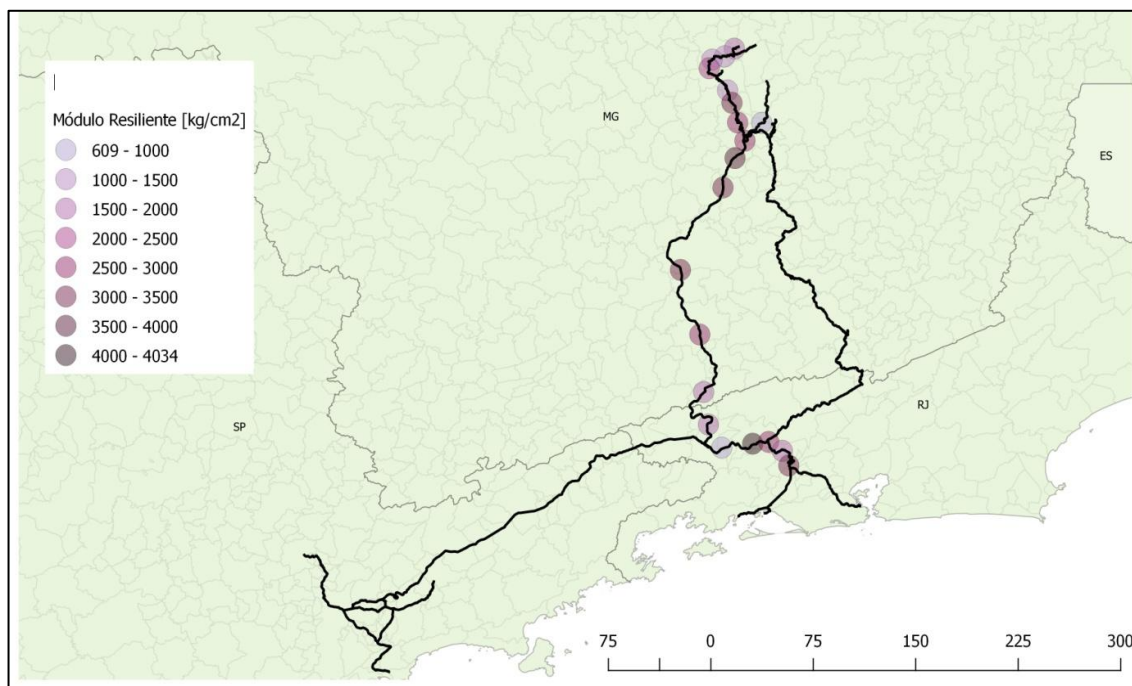


Figura 7: Módulo Resiliente de alguns pontos das vias da MRS

Fonte: Adaptado de Dariva (2016)

Outro ponto importante também a se notar é que o conhecimento das camadas subjacentes ao subleito é também de grande relevância, especialmente para solos mais suscetíveis à ação das cargas e efeitos climáticos. De acordo com Medina e Motta (2015), a degradação e assentamento das camadas abaixo dele acarretam um nível indesejável de desempenho da ferrovia.

Tendo em vista que o subleito é um elemento muito importante na qualidade da via, principalmente porque o mesmo não estará acessível para melhorias posteriores, há uma grande dificuldade de convivência com recalques de subleito em prazos longos, em função dos problemas que o alinhamento incorreto da via permanente acarreta ao material rodante da ferrovia.

Por isto, deve-se ter atenção especial em regiões em que as camadas subjacentes do solo são formadas por um material como as argilas moles, as quais, em virtude do seu elevado

índice de vazios, são muito compressíveis e geralmente possuem baixa resistência. Quando submetidas a carregamentos superiores à sua tensão de sobreadensamento (maior tensão à qual já estiveram submetidas), apresentam recalques que devem ser adequadamente avaliados e monitorados (NASCIMENTO, 2008).

A MRS, nos últimos anos, tem buscado elevar as taxas de carregamento anual aumentando a carga por eixo das composições que operam na via férrea de 32,5 para 36 toneladas por eixo e, com isto, uma maior solicitação será imposta às vias. Considerando que os territórios da Baixada Santista e da Baixada Fluminense são formados por depósitos marinhos e aluviais de argila mole de formação recente e que a empresa possui linhas nestas regiões, fica evidente a relevância do conhecimento do possível comportamento das deformações, tanto verticais (recalques) como horizontais, causadas pelo processo de adensamento.

Segundo a ABNT (1995), adensamento é a redução progressiva do volume de uma massa de solo ocasionada pelo seu peso próprio ou acréscimo de tensão externa, resultando na diminuição do seu volume de vazios causada pela expulsão de ar ou água. Este efeito é uma das principais causas dos recalques de um subleito.

Quanto mais rápido ocorre a dissipação de poropressão do solo, ou seja, quanto mais rápido a água for expulsa dos vazios, mais rapidamente se tem um ganho de resistência e o solo tem seu volume estabilizado, diminuindo assim a ocorrência progressiva de recalques ao longo do tempo.

Assim, uma forma de o administrador ferroviário analisar espacialmente a ocorrência de descarrilamentos e buscar alguma correlação de causa devido ao recalque da via é a utilização do coeficiente de adensamento vertical (c_v) do solo, o qual é um valor experimental que indica a velocidade com a qual há a dissipação de poropressões no solo.

Logo, quanto maior o seu valor, mais rápido a camada de argila tem seu recalque vertical total finalizado. Seu valor é diretamente proporcional à permeabilidade do solo (BERBERT, 2016).

O valor de c_v pode ser determinado através de ensaios de adensamento em laboratório, no ensaio de piezocone em campo, em que obtém-se inicialmente o coeficiente de adensamento horizontal (c_h) e, através de correlações, ele é obtido; ou através da retroanálise de curvas de recalque de aterros instrumentados.

Apesar do conhecimento das dificuldades inerentes à determinação do parâmetro c_v ou c_h que represente de fato o depósito, o conhecimento prévio de faixas de valores observadas em regiões próximas já servem como um suporte inicial para que o analista possa fazer certas inferências a respeito da condição de adensamento do terreno sob a via férrea analisando também o histórico de obras realizados neste local.

Através de trabalhos de vários autores reunidos e citados por Almeida e Marques (2014), foi possível obter acesso a algumas informações a respeito de algumas características geotécnicas tais como espessuras de camada, resistências e coeficiente de adensamento de alguns depósitos de argilas moles marinhas brasileiras de alguns locais como as Planícies de Santos (SP), Sarapuí (RJ), Porto de Rio Grande (RS), Recife (PE) e Porto de Sergipe (SE). Foram inseridos no QGIS os dados referentes apenas à região de Santos (figura 8) uma vez que este local será um dos estudados neste trabalho, como será explicado mais adiante.

Na referida região, foram observados valores de c_v numa faixa que varia entre 15 e 100 $\text{m}^2/\text{s} \times 10^{-8}$. Os valores mais altos podem estar associados à presença de camadas de areia em meio aos depósitos de argila, a qual acaba por "melhorar" os parâmetros do solo (principalmente a resistência). Porém, quando não são conhecidos os parâmetros do solo

por ensaios de campo e laboratório, o analista deve ter cuidado para ser conservador o suficiente em suas estimativas, a fim de manter um nível de segurança adequado.

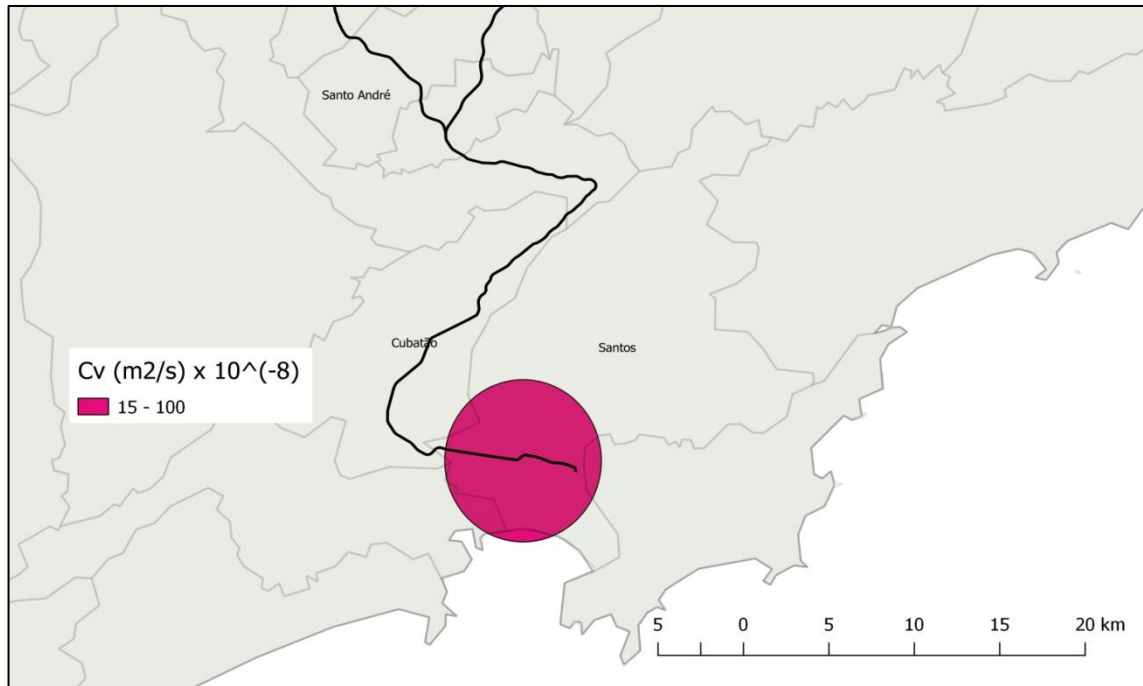


Figura 8: Coeficiente de Adensamento de Argilas da região de Santos - SP

4.2.4. Descarrilamentos nas vias da MRS

Como dito anteriormente, o objetivo deste estudo de caso é estudar espacialmente dos descarrilamentos ocorridos no período de 2010 a 2016. Nesse sentido, foi fornecida, pela MRS, uma planilha contendo acidentes notificados ocorridos no período estudado, com as respectivas localizações e principais motivos que ocasionaram os mesmos.

Este trabalho analisou apenas aqueles que a empresa julgou estarem relacionados a problemas de superestrutura influenciados pela sua infraestrutura. Foi constatado que houve 125 descarrilamentos, dos quais:

Tabela 4: Descarrilamentos ocorridos na MRS – 2010 a 2016

MOTIVO	TOTAL	%
Bitola aberta	20	16,00%
Geometria da via	16	12,80%
Falha do operador	10	8,00%
Fixação da linha	10	8,00%
Empeno - "warp"	10	8,00%
Fratura de trilho	10	8,00%
Excesso de material sobre a linha	6	4,80%
Falha do amv	6	4,80%
Torção - "twist"	6	4,80%
Folga na ponta da agulha	5	4,00%
Falha de manutenção	4	3,20%
Agulha desgastada	4	3,20%
Jacaré desgastado	3	2,40%
Lastro deficiente	3	2,40%
Bitola apertada	2	1,60%
Socaria deficiente	2	1,60%
Flambagem da linha	2	1,60%
Contra trilho desgastado	1	0,80%
Defeito do aparelho de choque e tração	1	0,80%
Engate rompido	1	0,80%
Junta arriada	1	0,80%
Obstáculo na via	1	0,80%
Fratura de eixo	1	0,80%
TOTAL	125	100%

Fonte: MRS 2016

Ainda, para este estudo, além dos descarrilamentos totais, foram separados os descarrilamentos nos trechos e nos pátios das vias (Tabela 5).

Tabela 5: Descarrilamentos ocorridos na MRS – 2010 a 2016 – Trechos e Pátios

TRECHOS			PÁTIOS		
MOTIVO	TOTAL	%	MOTIVO	TOTAL	%
Geometria da via	13	15,29%	Bitola aberta	8	20,00%
Bitola aberta	12	14,12%	Agulha desgastada	3	7,50%
Falha do operador	9	10,59%	Empeno - "WARP"	3	7,50%
Fixação da linha	8	9,41%	Fratura de trilho	3	7,50%
Empeno - "WARP"	7	8,24%	Geometria da via	3	7,50%
Fratura de trilho	7	8,24%	Excesso de material sobre a linha	2	5,00%
Folga na ponta da agulha	5	5,88%	Falha de manutenção	2	5,00%
Excesso de material sobre a linha	4	4,71%	Falha do AMV	2	5,00%
Falha do AMV	4	4,71%	Lastro deficiente	2	5,00%
Torção - "TWIST"	4	4,71%	Torção - "TWIST"	2	5,00%
Bitola apertada	2	2,35%	Fixação da linha	2	5,00%
Falha de manutenção	2	2,35%	Flambagem da linha	2	5,00%
Jacaré desgastado	2	2,35%	Jacaré desgastado	1	2,50%
Agulha desgastada	1	1,18%	Junta arriada	1	2,50%
Contra trilho desgastado	1	1,18%	Obstáculo na via	1	2,50%
Defeito aparelho de choque e tração	1	1,18%	Socaria deficiente	1	2,50%
Engate rompido	1	1,18%	Falha do operador	1	2,50%
Lastro deficiente	1	1,18%	Fratura de eixo	1	2,50%
Socaria deficiente	1	1,18%	TOTAL	40	100%
TOTAL	85	100%			

Fonte: MRS 2016

Da análise dos dados fornecidos, verifica-se que os motivos mais incisivos nos trechos foram a geometria da via e a bitola aberta. Nos pátios, a maior incidência foi de bitola aberta. OS dados dos descarrilamentos foram representados nos mapas das figuras 9 e 10 respectivamente.

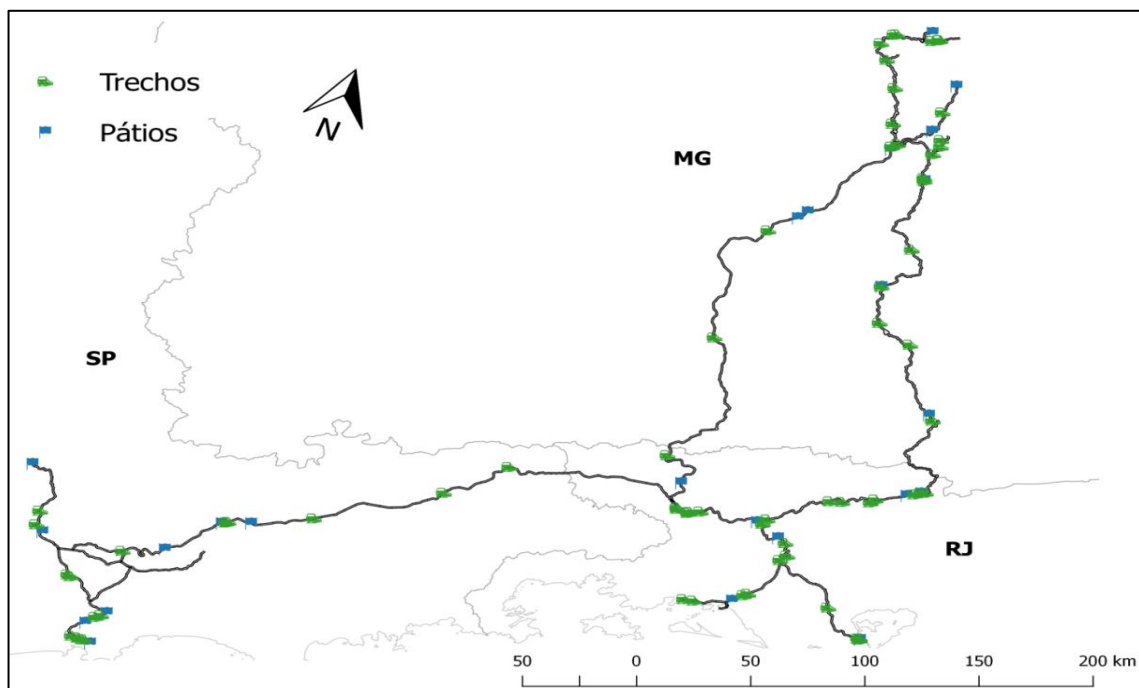


Figura 9: Pátios e Trechos onde ocorreram os descarrilamentos

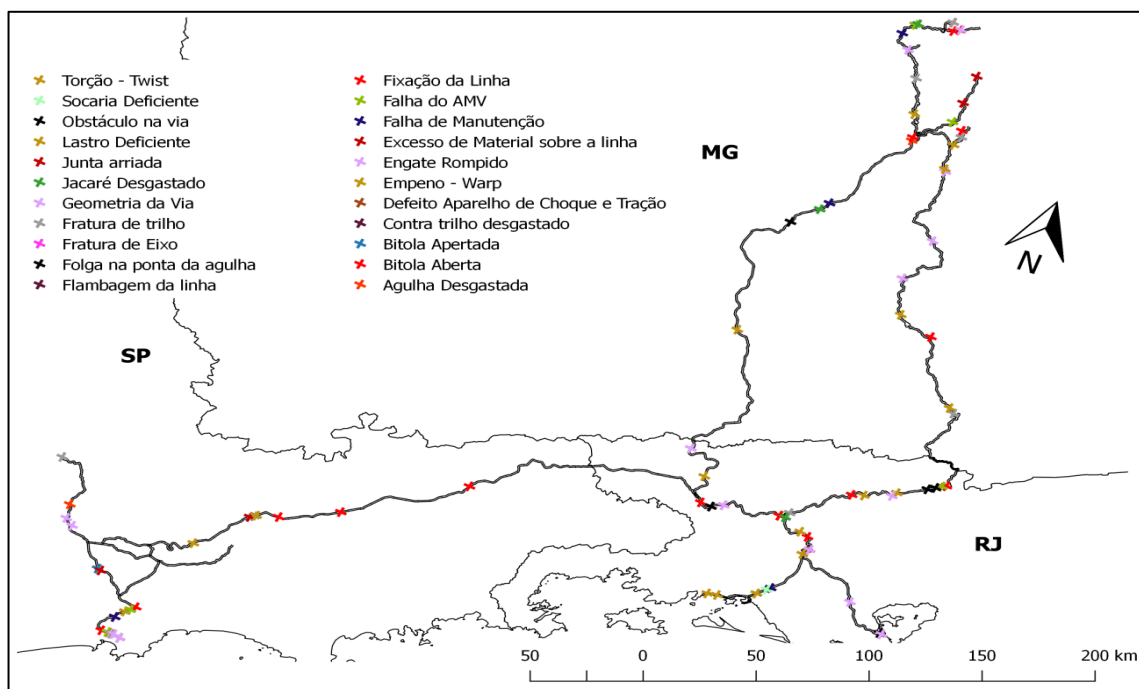


Figura 10: Descarrilamentos por tipo

Da análise do mapa de calor dos dados noticiados (figura 11) foi verificado que os maiores números de descarrilamentos ocorreram na região de Santos, Cubatão e Santo André, em São Paulo; Barra do Piraí, no Rio de Janeiro e em Sarzedo, Minas Gerais. Estes foram os

trechos analisados nesta pesquisa.

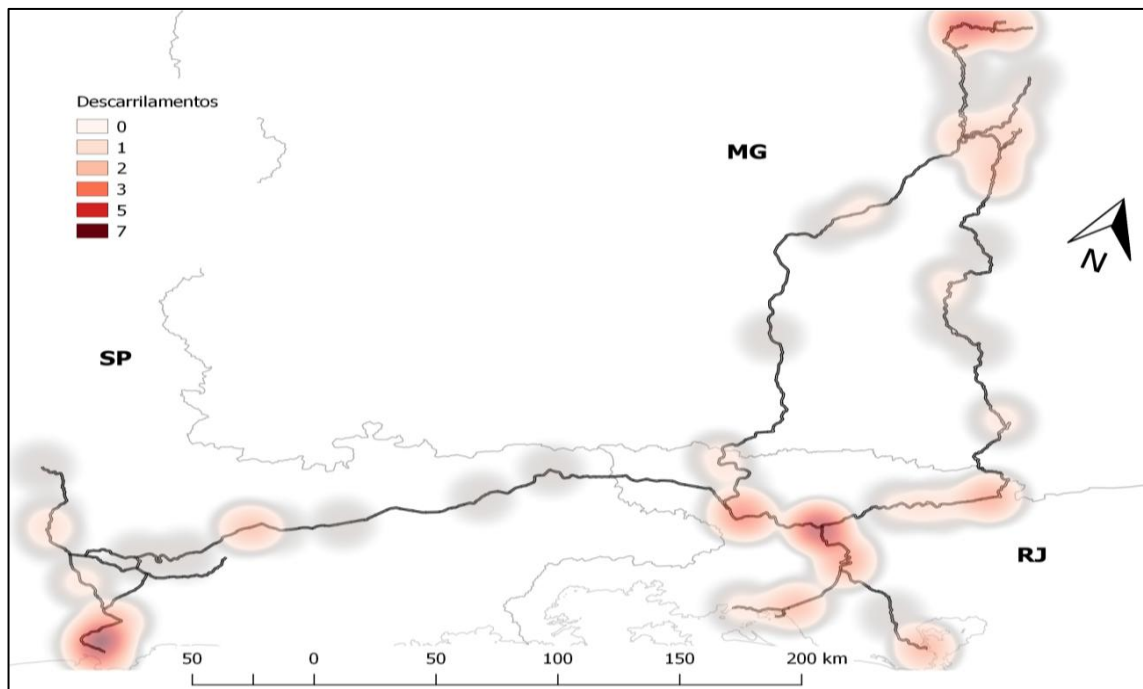


Figura 11: Mapa de Calor dos Descarrilamentos

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente, foi verificada a interação entre as causas dos descarrilamentos nos três locais selecionados e os fatores físicos e climatológicos levantados até aqui e inseridos no QGIS.

Na região do trecho em São Paulo, com o maior número de descarrilamento, destaca-se as seguintes ocorrências: 3 por bitola aberta, 1 por bitola apertada, 2 por excessos de material sobre a via, 02 falhas do AMV (aparelho de mudança de via), 1 geometria da via, 1 empeno “warp” (diferença entre superelevações dentro de uma determinada distância).

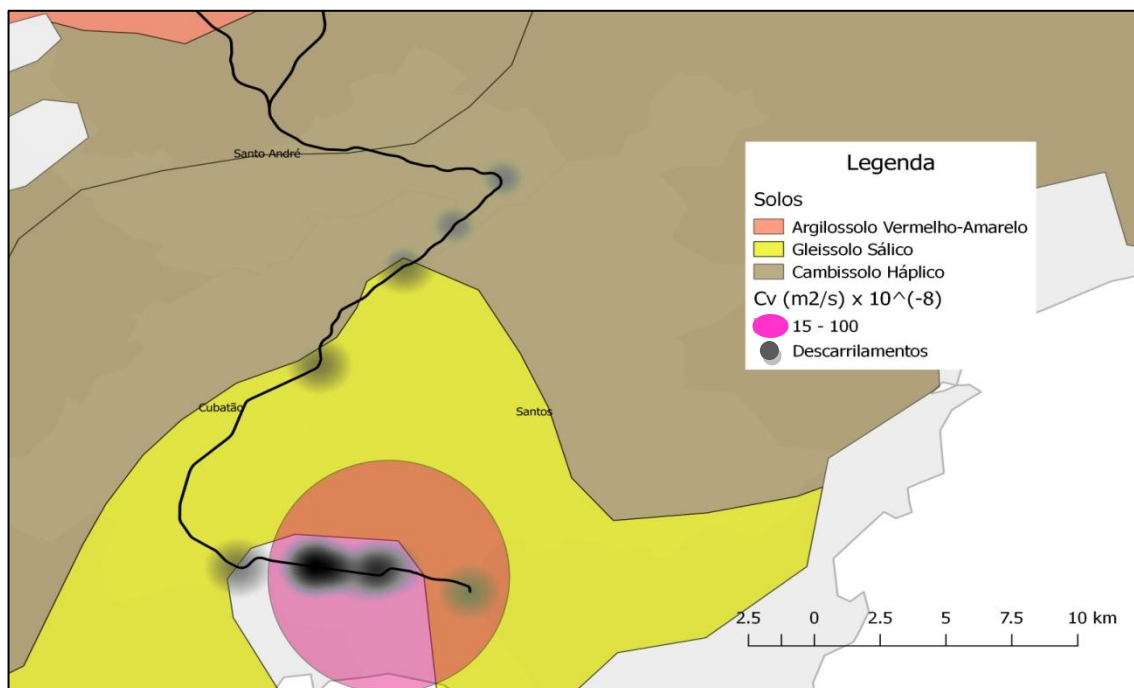


Figura 12: Descarrilamentos na região de SP

Em relação aos tipos de solos, foi detectado que os predominantes da Região são o Gleissolo Sáfico, Cambissolo Háplico e Argilossolo Vermelho-Amarelo, conforme mostra a Figura 12. O regime pluvial da região caracteriza-se por médias pluviométricas elevadas.

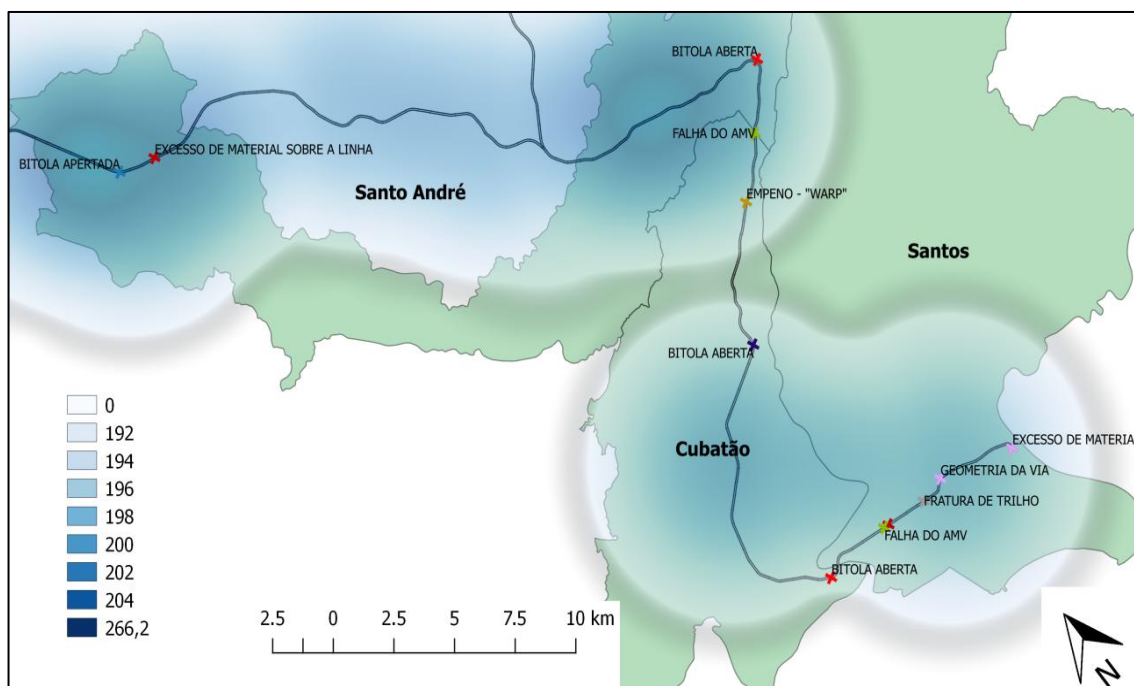


Figura 13: Descarrilamentos na região de SP – Pluviometria (em mm/m²)

Verifica-se pelas imagens anteriores que a maior incidência dos descarrilamentos foi exatamente numa região que possivelmente apresenta solos mal drenados (gleissolo sálico) e com camadas de argila mole até uma faixa de 50 metros.

Unindo um baixo valor de c_v à uma má condição de drenagem, pode-se inferir que o solo subjacente pode não ter alcançado ainda o nível de adensamento total esperado. Isto significa que a cota da via poderá sofrer ainda mais rebaixamento ao longo do tempo em alguns pontos, causando assim problemas de desnivelamento. Com o aumento de carga por eixo já citado anteriormente, este processo será ainda mais acelerado.

Já em Barra do Piraí, no Rio de Janeiro, foram verificados os seguintes motivos de descarrilamentos: 6 por bitola aberta, 1 por contra trilho desgastado, 1 por fratura de trilho, 1 por empeno “warp”, 1 por jacaré avariado e 1 por agulha com defeito.

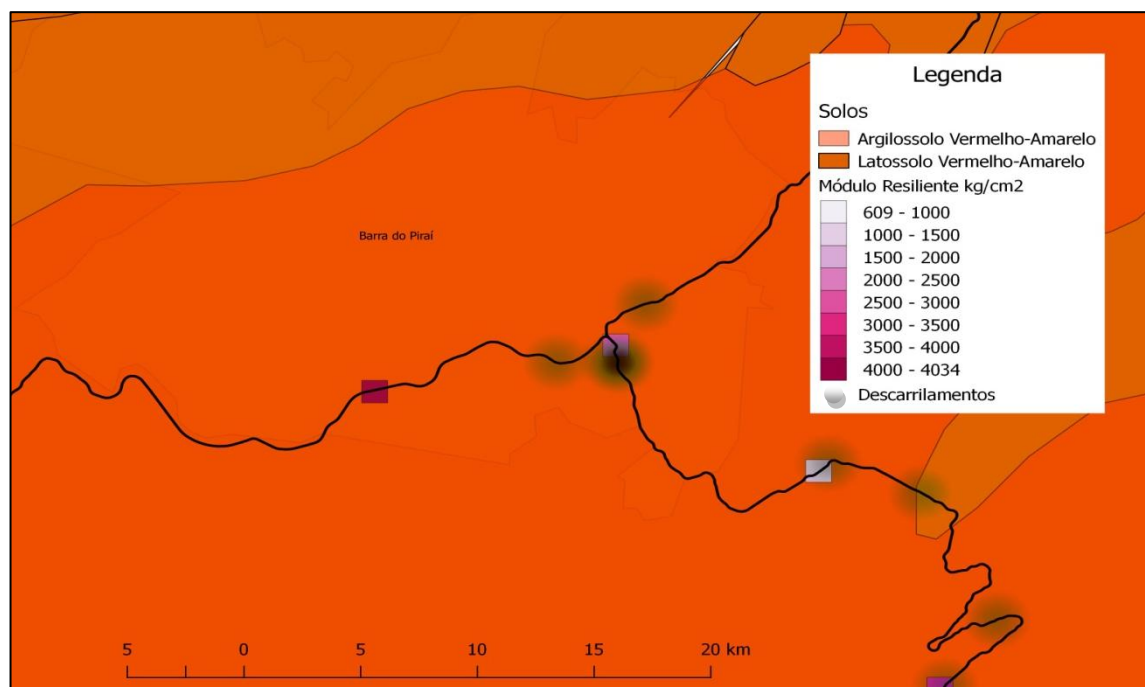


Figura 14: Descarrilamentos na região do RJ

Pelo estudo apresentado, foi percebido que o solo predominante da região dos descarrilamentos é o Argilossolo Vermelho-Amarelo (figura 14) e o regime pluvial da região

onde ocorreram os descarrilamentos é média a baixa (figura 15).

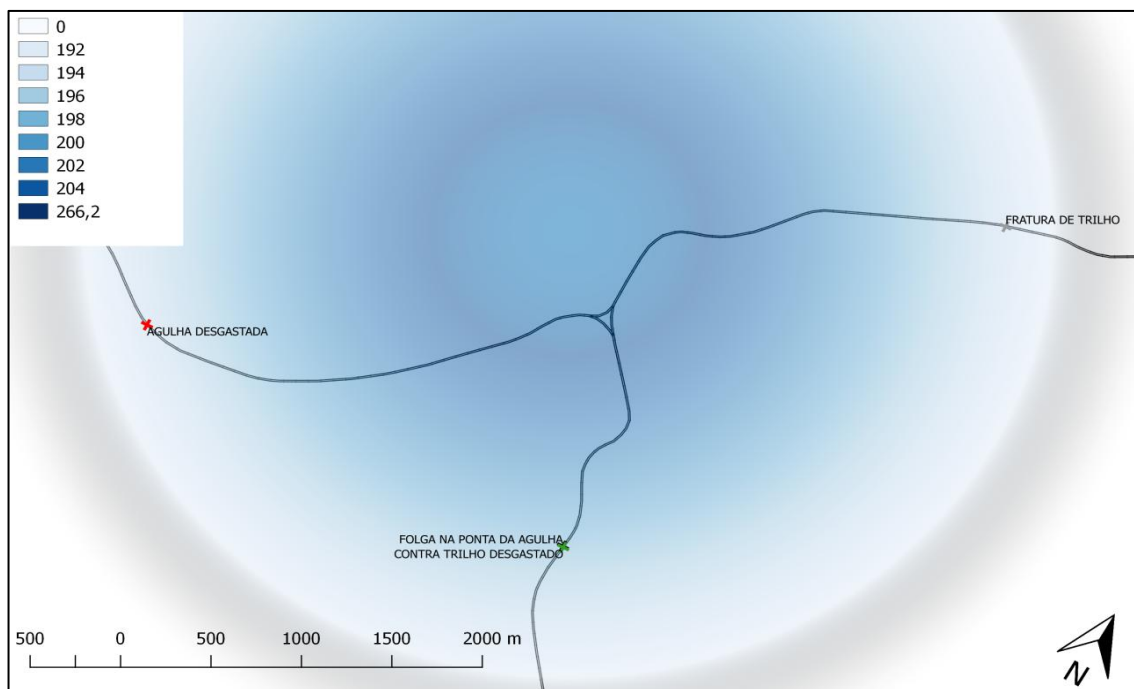


Figura 15: Descarrilamentos na região do RJ – Pluviometria (em mm/m²)

Nota-se que a maior ocorrência de descarrilamentos ocorreu numa região com um solo de módulo resiliente considerado baixo. Além disto, os latossolos vermelho-amarelo podem apresentar uma porcentagem muito alta de argila a qual, comparando ao material arenoso, apresentará uma resistência menor às cargas impostas pelo tráfego.

Sabe-se que este trecho analisado encontra-se na descida da serra, possuindo trechos com declividade considerável. Assim, ainda mais esforço é transmitido dos veículos à via.

Com a infraestrutura apresentando uma resposta resiliente insuficiente, ou seja, um baixo de nível de absorção dos impactos e baixa resistência ao movimento lateral dos dormentes, haverá um esforço muito maior nestes elementos da superestrutura assim como nas fixações. Desta forma, defeitos como a bitola aberta (causada principalmente por deficiência destes dispositivos citados), ocorrerão na via. Este foi o trecho com maior presença de descarrilamentos por este motivo.

Por fim, na região entre Sarzedo e Mário Campos, em Minas Gerais, os motivos para os descarrilamentos foram: 3 por bitola aberta, 2 por falhas no AMV, 2 pela geometria da via e 1 jacaré avariado. O solo da região é o Latossolo Vermelho-Amarelo (figura 16) e o regime pluviométrico médio a baixo (figura 17).

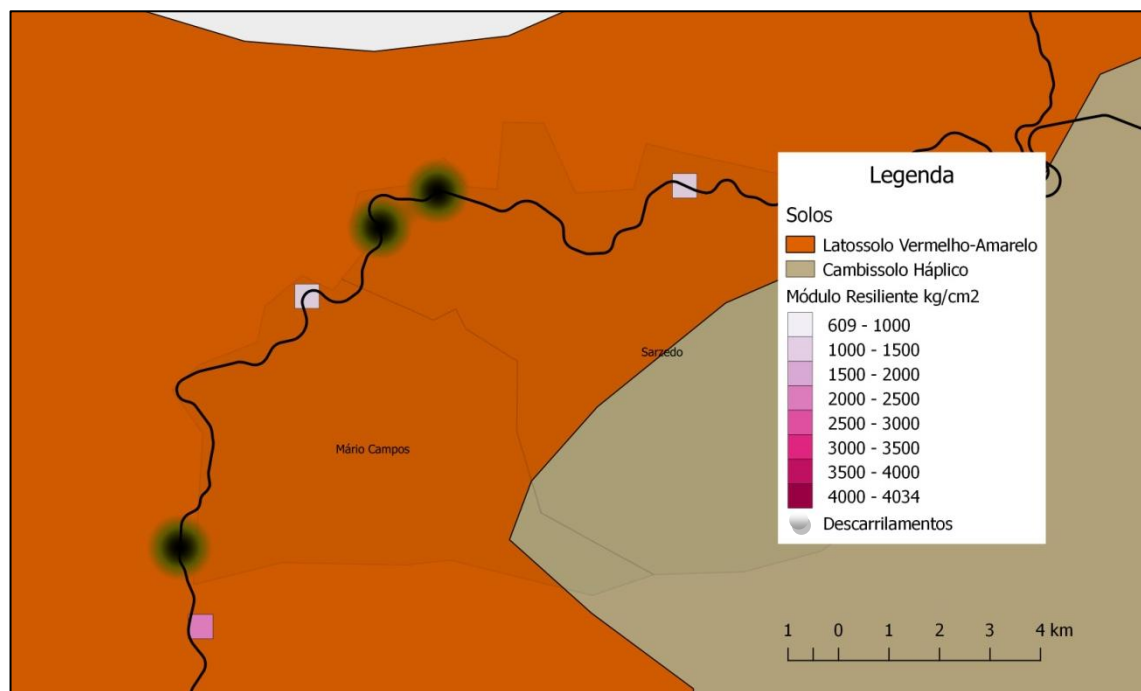


Figura 16: Descarrilamentos na região de MG

A respeito da região representada anteriormente, não há informações suficientes para associar aos pontos com maior incidência de acidentes a resposta resiliente do solo, por exemplo, uma vez que as amostras analisadas por Dariva (2016) estão mais distanciadas destas e, assim, a estrutura e composição do solo podem apresentar variação considerável.

Porém, como o solo pode apresentar uma grande quantidade de partículas finas, se a drenagem local for inadequada, a cada ciclo de chuva a água ficará retida no subleito e com a passagem dos veículos haverá a chance de ocorrer o fenômeno de subida destes finos até as camadas de sublastro e lastro, contaminando-os assim.

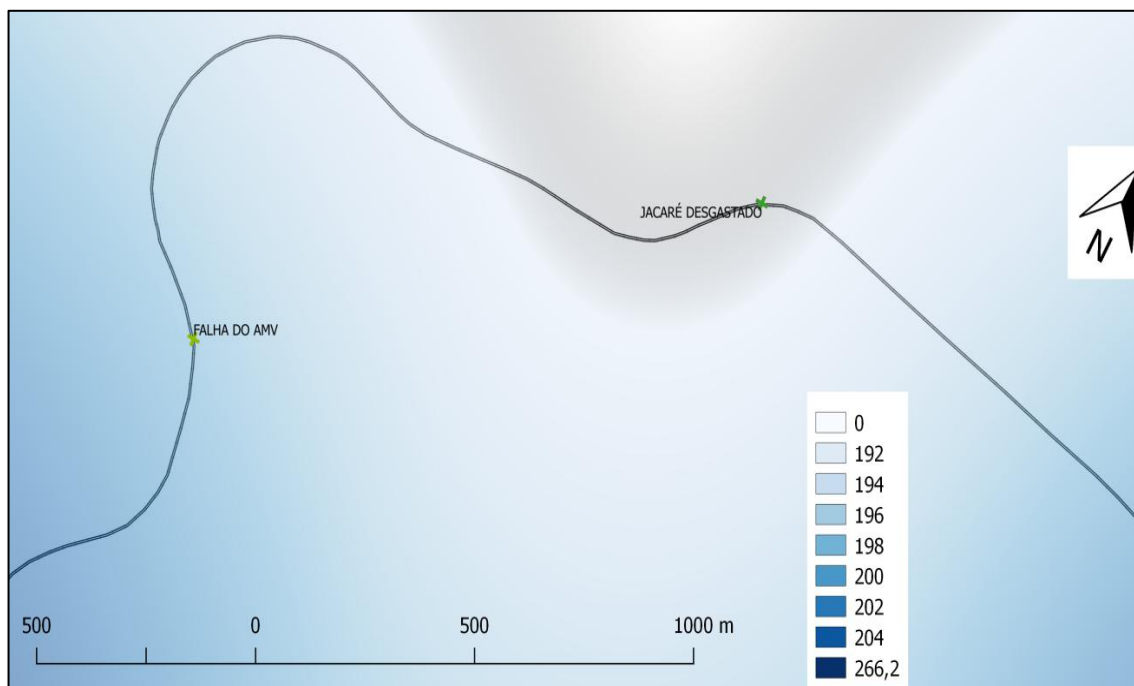


Figura 17: Descarrilamentos na região de MG – Pluviometria (em mm/m²)

Esta contaminação provoca bolsões de lama que diminuirão a capacidade elástica do lastro em absorver os esforços transmitidos pelos dormentes. Assim, estes apresentarão um desgaste excessivo e com isto a sua vida útil estará muito comprometida.

Desta forma, a investigação da infraestrutura nestes locais poderia estar associada à averiguação do teor de umidade do solo e ao grau de limpeza das camadas granulares a fim de verificar estas ocorrências citadas anteriormente.

Constata-se, a partir da análise dos mapas representados até aqui, que foi possível realizar algumas correlações com as informações levantadas e inseridas no *software*. Diante disto, fica evidenciado que quanto mais informações disponíveis e mais específicas elas forem, melhor será a análise pontual.

Ademais, uma outra tentativa de análise espacial desta pesquisa foi em relação ao índice qualidade da via (TQI), preconizado por Khouy (2013), que utiliza os dados de entrada da principal ferramenta de inspeção de linha utilizada atualmente pela MRS, um veículo de

inspeção chamado TrackStar que capta as variações longitudinais e transversais da linha, bem como eixos aplicadores de carga que simulam a passagem de trens carregados, gerando efeitos de bitola dinâmica.

Ele é programado com os limites de manutenção das normas da FRA, as quais foram adaptadas e adotadas no Brasil. Quando esses limites são ultrapassados eles são caracterizados como defeitos; estes defeitos são priorizados conforme sua criticidade, aumentando-a conforme a velocidade do trecho em questão.

O índice trabalha com o desvio padrão da média dos nivelamentos longitudinais dos dois trilhos com e é designado para um trecho de geralmente 1 quilômetro. Quanto menor o índice, melhor a qualidade da via (SALOMÃO et al., 2015).

A partir dos acidentes noticiados sobrepostos aos trechos classificados pelo TQI, a equipe de investigação visualizará de forma mais rápida e simples se eles estão diretamente ligados a problemas de geometria da via (quando o local apresentar um índice elevado) ou se a causa estará, por exemplo, associada a anomalias nos veículos (quando o índice da via demonstrar que ela está em boas condições de estado).

Por se tratarem de informações confidenciais, a empresa não disponibilizou estes índices de qualidade de sua malha ferroviária, porém, como mostrado na figura 18, está representado um exemplo da sua aplicabilidade no QGIS.

Utilizando este tipo de dado, através de um processo contínuo de monitoramento pode-se realizar uma comparação dos trechos, conseguindo criar uma lista de priorização dos piores quilômetros de um trecho e assim focar atividades corretivas a estes locais.

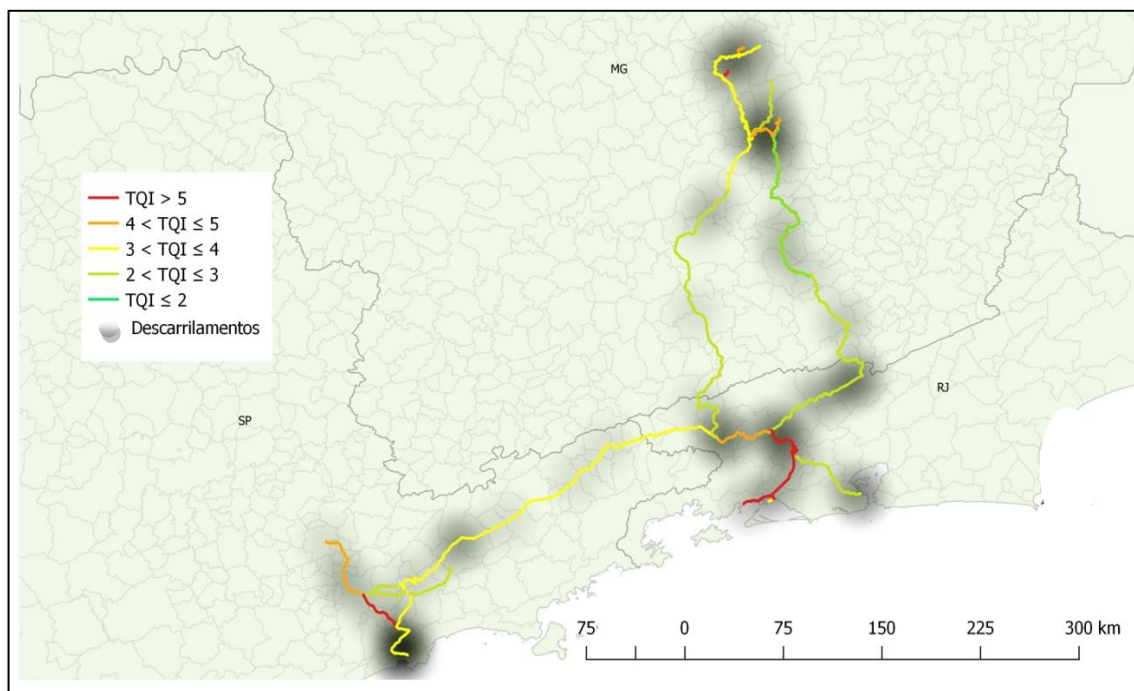


Figura 18: Trechos classificados pelo índice TQI (Exemplificação)

6. CONCLUSÕES

A partir do que foi exposto até aqui, foi percebido que a capacidade para produzir novas informações a partir da manipulação de dados georreferenciados e a facilidade da análise dos resultados gerados demonstraram como um sistema de informações geográficas (SIG) contribui no subsídio para tomada de decisões e consequente intervenção no espaço em diversas áreas.

No caso do setor de transporte ferroviário, um SIG é capaz de auxiliar a administração da infraestrutura a identificar pontos críticos com alta incidência de acidentes e associar a estes eventos possíveis causas e quais fatores mais significativos.

Assim, o QGIS se mostrou útil em análises para se evitar a ocorrência de acidentes, sendo uma ferramenta de fácil implementação e uso pelas empresas além de apresentar um baixo custo.

Além disto, através deste trabalho, observou-se como informações de várias fontes puderam ser integradas no programa e que a visualização final foi de fácil entendimento e manipulação.

Quando os dados são georreferenciados adequadamente, esta ferramenta se equipara às utilizadas amplamente para filtrar e classificar informações por atributos, como as planilhas do Excel, porém com um adicional de que elas proporcionam uma percepção mais rápida e abrangente pelo fato haver uma representação espacial.

Vale a pena ressaltar que quanto mais precisos são os dados e quanto maior as fontes disponíveis, maior serão a eficácia e exatidão das análises feitas. Este trabalho se restringiu apenas a tratar de informações de domínio público, uma vez que muitos dados privados não foram disponibilizados pela empresa estudada.

Porém, a administração tendo posse destas informações, especialmente os parâmetros do solo os quais apresentam formações geológicas e comportamento mecânico diferentes de região para região, poderia realizar uma investigação mais precisa das causas dos acidentes utilizando esta mesma ferramenta.

Por fim, o presente trabalho sugere que, para se evitar descarrilamentos, sejam reunidos esforços por parte da iniciativa privada para que haja uma padronização dos dados coletados em campo, em especial as coordenadas do ponto onde de fato ocorreu o acidente, e das demais informações disponíveis para que se tenha uma base de dados completa e totalmente integrada para que as causas sejam identificadas e evitadas no futuro.

7. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. MARQUES, E. **Aterros sobre solos moles - Projeto e Desempenho**. 2ª ed. editora Oficina de Textos. Rio de Janeiro. 2014.
- ANTT, Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Relatório 01/2014/GEROF/SUFER/ANTT**. Disponível em <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/36436/Relatorios_de_Acidentes.html> Acesso em 21 de junho de 2017.
- BERBERT, L. A. **Avaliação Dos Coeficientes De Adensamento Vertical E Horizontal De Um Depósito De Solo Mole Para A Previsão De Recalques Em Obras De Infraestrutura**. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia (IME). 2016.
- BRANCO, J. E. C.; FERREIRA, R. **Tratado de estradas de ferro: prevenção e investigação de descarrilamentos**. Editora Reflexus. 2002.
- BRINA, H. L. **Estradas de Ferro**. Volumes 1 e 2. Editora UFMG. Belo Horizonte. 1998.
- CÂMARA, G.; CASANOVA M. A., HEMERLY, A. S.; MAGALHÃES, G. C.; MEDEIROS, C. M. B. **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica**. INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 1996.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tipos de Solo**. 2016.
- GUIMARÃES, A. C. R. **Um Método Mecanístico Empírico para Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.
- DARIVA, L. B. **Avaliação Das Propriedades Físicas E Mecânicas De Um Subleito De Pavimento De Via Férrea Do Tipo Heavy Haul**. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia (IME). 2016.

- GONÇALVES, R. F. e PARREIRA, A. B. **Influencia da Variação do Teor de Umidade no Valor do Módulo de Resiliência de um Solo Argiloso de Subleito Rodoviário**. In: XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, São Carlos, São Paulo, 1999.
- HONG, W. **Aplicação do método de análise de risco ao estudo do descarilamento**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 2011.
- INCRA, Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. BARBERI, Alexandre; SANTOS, Hélder Gramacho dos; OLIVEIRA, Israel Ely de Almeida; GOMES, Marília Ferreira. **Elaboração de Mapas Temáticos no Quantum GIS**. 5ª Versão. 2012.
- INCRA, Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. **Anatomia de um SIG**. 2001.
- IRICEN, Indian Railways Institute of Civil Engineering. **The investigation of derailments**. 3ª edição. Índia. 2007.
- IWNICKI, S. **Handbook of Railway Vehicle Dynamics**. Editora CRC Press . 2006.
- LIMA, H. A. D. **Procedimento para seleção de método de manutenção para a superestrutura ferroviária**. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia. 1998.
- MARANGON, M. **Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para Região de Minas Gerais Utilizando Solos Lateríticos Locais a Partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. 2004.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G da. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª Edição. ISBN 978-85-7193-366-8. Rio de Janeiro 2015.
- NASCIMENTO, C. M. C. **Avaliação De Alternativas De Processos Construtivos De Ferrovias Sobre Solos Moles**. Monografia de Especialização, Instituto Militar de Engenharia (IME). Rio de Janeiro. 2008.

- RFA, Federal Railroad Administration. Railroad Safety Statistics. **Ten Year Accident / Incident Overview**. Disponível em <<http://safetydata.fra.dot.gov/OfficeofSafetypublicsite/Query/TenYearAccidentIncidentOverview.aspx>> Acesso em 21 de junho de 2017.
- SALOMÃO, M. J. de P. LOPES, L. A. S. FERREIRA, P. A. G. **Proposta De Método Alternativo para Planejamento de Socaria**. Artigo. 2015.
- VIDON, W. **Análise e Prevenção de Descarrilamentos**. Apostila para o curso de Especialização em Transporte Ferroviário. Instituto Militar de Engenharia (IME). 2017.