

Localização estratégica de equipamentos de monitoramento eletrônico para interceptação de fluxo evasivo em malhas rodoviárias

Camila Quevedo Sobrosa^a, Lucas Franceschi^b, Gustavo Garcia Otto^c, Amir Mattar Valente^d,
Laboratório de Transportes e Logística - LabTrans/UFSC

^acamilaquevedosobrosa@gmail.com

^bfranceschi.lucas@gmail.com

^cotto.gus@gmail.com

^damir.valente@ufsc.br

RESUMO: No âmbito da fiscalização rodoviária, os equipamentos eletrônicos automatizados são capazes de ler as características dos veículos passantes, incluindo sua identificação, medidas, velocidade e peso. Embora tais equipamentos possam ser utilizados para criar malhas de monitoramento, os condutores podem, em muitos contextos, planejar suas rotas de forma a evitar a passagem por esses sistemas, sabendo a sua localização. Fluxos que podem apresentar tais tendências evasivas são, por exemplo, veículos intencionalmente sobrecarregados, furtados ou executando outras atividades ilegais. O impacto negativo desses fluxos pode ser minimizado com o uso de modelos de localização que considerem a tendência evasiva. Visto isso, este artigo apresenta um estudo de caso, no qual aplica dois modelos, que consideram o Problema de Captura de Fluxo Evasivo (EFCP), na malha rodoviária do estado do Pará. Como resultado dessa aplicação, conclui-se que dois postos de fiscalização de peso, posicionados de maneira otimizada, são capazes de reduzir satisfatoriamente o dano causado por veículos com sobrepeso na infraestrutura da malha analisada.

ABSTRACT: In the context of road enforcement, automated electronic equipment are capable of reading the characteristics of passing vehicles, including their identification, measurements, speed and weight. Although such equipment can be used to create monitoring loops, drivers can, in many contexts, plan their routes in order to avoid passing through these systems, knowing their location. Flows that may exhibit such evasive tendencies are, for example, vehicles intentionally overloaded, stolen or carrying out other illegal activities. The negative impact of these flows can be minimized by using location models that consider the driver's evasive behavior. In view of this, this article presents a case study, in which it applies two models, which consider the Evasive Flow Capture Problem (EFCP), in the road network of the state of Pará. As a result of this application, it is concluded that two weight inspection posts, optimally positioned, are able to satisfactorily reduce the damage caused by overweight vehicles in the infrastructure of the analyzed network.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas de transporte. Fluxos evasivos. Fiscalização. Interceptação. Malhas viárias.

KEYWORDS: Transportation systems. Evasive flow. Enforcement. Interception. Road networks.

1. Introdução

Veículos automotores em condições ilegais trafegando nas rodovias brasileiras representam diversos tipos de risco à segurança [1], à infraestrutura de transportes [2] e à economia [3]. Tais condições incluem velocidade excessiva, não licenciamento, excesso de peso, transporte de cargas especiais ou perigosas incorretamente acondicionadas, dentre outras situações de ilegalidade. Além disso, no planejamento estratégico dos sistemas de transporte e na gestão

da malha rodoviária, é essencial que se conheça a natureza dos fluxos viários de uma determinada região, para que se possa priorizar investimentos e realizar a fiscalização do tráfego. Ambas as tarefas estão associadas à necessidade de aferir diretamente as características dos veículos em trânsito.

Coletar dados do fluxo rodoviário de maneira direta, no entanto, não é uma tarefa trivial para as entidades brasileiras.

A malha rodoviária do Brasil é extensa, somando 1.719.991 km de rodovias [4]. Mesmo considerando

apenas as rodovias em jurisdição federal, se trata de uma malha de 75.744 km, pela qual passam fluxos dos mais variados tipos, com origens e destinos diversos.

Por isso, a utilização de equipamentos eletrônicos de monitoramento viário possui grande potencial para o controle do tráfego nas rodovias. Esses possuem a capacidade de verificar características importantes dos veículos que passam em um determinado ponto sem que o fluxo seja interrompido. Dentre as funcionalidades desses sensores está a aferição da velocidade [5], a leitura das placas, a medição das dimensões totais do veículo, a pesagem dos eixos em alta velocidade [2] e outros sistemas de identificação veicular [6].

Os condutores que trafegam com seus veículos em situação ilegal, porém, normalmente fazem isso de forma consciente [7, 8, 9]. Isso pois, transitar com sobrepeso, ou sem o acondicionamento correto de cargas perigosas, por exemplo, pode trazer lucro ao transportador através da redução de seus custos (tal lucro particular é pago pela sociedade, através de custos mais elevados de manutenção da malha viária e de maiores riscos à segurança nas rodovias). Assim, a partir da instalação de equipamentos de monitoramento e fiscalização, os transportadores em situação ilegal, ao conhecerem a localização desses, buscarão alterar suas rotas, de forma a evitar que seus veículos sejam detectados.

A relação entre a decisão do lanejador da malha – de onde instalar equipamentos de fiscalização – e a decisão do transportador em situação ilegal – de trafegar evitando passar por esses dispositivos, dá origem à formulação do problema matemático de otimização conhecido como problema de captura de fluxos evasivos (*Evasive Flow Capture Problem, EFCP*) [10, 11, 12]. Nessa formulação, se busca identificar as localizações ótimas para instalar sensores de fiscalização de tal forma que o conjunto desses sistemas minimize a existência de rotas não monitoradas.

Através de um planejamento eficiente da distribuição dos sensores de monitoramento pela malha rodoviária, considerando tal tendência evasiva, é possível que seja criada uma “cerca” de dispositivos eletrônicos, através da qual todos os fluxos em uma

determinada região são interceptados pelo menos uma vez. Esse tipo de aplicação possui grande potencial para a inteligência nacional, permitindo que sejam estabelecidos sistemas de fiscalização com grande eficiência e pouca possibilidade de evasão. Além disso, considerar a tendência evasiva não aumenta significativamente o número de equipamentos a serem instalados, mas apenas otimiza a escolha dos locais para priorizar aqueles que geram a maior cobertura dos fluxos [13].

1.1 Metodologia

Com o intuito de realizar o objetivo deste trabalho, aplicação de modelos de localização de equipamentos de fiscalização de peso, foram realizadas duas etapas: revisão sistemática de literatura e implementação e aplicação dos modelos - estudo de caso.

A primeira etapa, revisão narrativa e sistemática de literatura, foi realizada com o propósito de selecionar quais seriam os modelos mais indicados para a aplicação na malha rodoviária brasileira. Nesse contexto, foram coletados trabalhos relacionados aos temas: localização de equipamentos de fiscalização, evasão pela mudança de rota e formulação matemática do EFCP e suas soluções.

Após tal revisão, os métodos propostos por Marković et al. [10] e Arslan et al. [14] foram selecionados para a aplicação prática deste trabalho. Esses foram implementados através da linguagem de programação Python e do uso das bibliotecas PuLP [15] e MIP [16], respectivamente. O primeiro passo dessa implementação foi um estudo minucioso a respeito das equações e peculiaridades dos modelos, a fim de transcrevê-los para a linguagem de programação escolhida. Posteriormente, foram inseridas nos modelos restrições personalizadas, criadas pelos autores com o intuito de adaptar os modelos à realidade das rodovias brasileiras.

Por fim, foi selecionada para o estudo de caso a malha rodoviária do estado do Pará, que mesmo com baixa densidade de rodovias, possui um fluxo de carga relevante para a região norte do Brasil.

2. Revisão sistemática sobre modelos de localização de equipamentos de fiscalização

Diferente da revisão tradicional ou narrativa, a revisão sistemática se trata de uma metodologia mais minuciosa, a qual utiliza métodos sistematizados de busca, com o intuito de avaliar a aplicabilidade e a relevância de cada um dos estudos encontrados. Esse procedimento tem a intenção de minimizar a influência do pesquisador na seleção dos trabalhos de análise, executando um processo de escolha independente da sua opinião pessoal [17].

A primeira etapa deste processo foi a formulação da questão de investigação, a qual direcionou a pesquisa. O enfoque dessa foi abranger o maior número possível de estudos relacionados ao tema e encontrar métodos que utilizassem como parâmetros dados da malha como: volumes de tráfego, número de acidentes, geometria das rodovias, natureza dos fluxos de carga, entre outros.

Posteriormente foram definidos os critérios de exclusão e inclusão de estudos, como a data de publicação (considerados apenas os publicados a partir de 2012), o idioma (inglês ou português), a disponibilidade e a relevância, medida com base na data de publicação e no número de citações. Para a realização dessas buscas foram utilizadas as bases de dados Scopus, Scielo, Web of Science, Springer e EBSCOhost, e definidas as palavras-chave:

- *Placement of automated enforcement equipment;*
- *Evasive flow capturing problem;*
- *Enforcement equipments on Highway; (location OR placement) AND (equipment OR station OR wim OR enforcement) AND (highways R roads OR motorway OR carriageway OR freeway).*

Após essa busca, foram extraídas informações dos resultados encontrados, como título, autores, código DOI, URL para download, resumo e data de publicação. Posteriormente, foi realizada a seleção das pesquisas através de etapas de filtragem. A primeira delas foi a remoção dos duplicados, que reduziu consideravelmente a quantidade dos considerados relevantes. Feito isso, foram lidos

os títulos, realizada uma pesquisa a respeito do número de citações e descartados os publicados antes de 2019 com menos de 5 citações. Então, foram lidos os resumos e mantidos apenas os realmente coincidentes com o tema e com conteúdo completo disponível. Na **tabela 1** se encontra o número de estudos resultantes de cada etapa de seleção da revisão sistemática.

Tab. 1 - Quantitativo dos resultados obtidos nas etapas de seleção de estudos da revisão sistemática

Etapa	Nº de estudos resultantes
Busca na base de dados	7160
Exclusão dos títulos duplicados	5987
Filtragem pelos títulos relevantes	241
Classificação pelo número de citações e ano de publicação	171
Filtragem pelos resumos relevantes	55
Verificação da disponibilidade dos textos completos	54

Fonte: Os autores.

Portanto, foi realizada a leitura completa dos trabalhos selecionados, observando os métodos utilizados, os temas abordados e os resultados obtidos. Então, 25% das pesquisas corresponderam ao tema desejado, apresentadas na Tabela 2.

Tab. 2 - Metodologias utilizadas nos estudos encontrados na revisão sistemática.

Referência	Assunto abordado	Metodologia utilizada
[19]	Fiscalização de peso	Processo Hierárquico Analítico

Referência	Assunto abordado	Metodologia utilizada
[14]	Fiscalização de peso	Modelo de otimização em dois níveis e algoritmo Branch and Cut
[11]	Fiscalização de peso	Modelo pessimista de otimização em dois níveis e algoritmo de plano de corte
[20]	Contagem de fluxo	Algoritmo genético com chaves aleatórias viciadas
[21]	Contagem de fluxo	Algoritmo Branch and Cut e heurística de agrupamento
[12]	Fiscalização de peso	Modelo de otimização de dois níveis e algoritmo Karush-Kuhn-Tucker
[22]	Contagem de fluxo	Modelo bayesiano ponderado seletivo
[23]	Fiscalização de peso	Processo Hierárquico Analítico
[24]	Contagem de fluxo	Meta-heurística colônia de abelhas
[25]	Fiscalização de emissão de gases	Modelo de programação não linear e algoritmo genético
[26]	Fiscalização de peso	Modelo simplificado de interceptação de fluxos determinísticos
[27]	Contagem de fluxo	Modelo duplamente estocástico e condicionalmente binomial
[28]	Localização de patrulhas policiais	Modelo de programação linear inteira mista e algoritmo heurístico
[29]	Fiscalização de peso	Modelo de otimização em dois níveis e heurística
[30]	Contagem de fluxo	Modelo de predição híbrida com algoritmo genético

[31]	Fiscalização de peso	Modelo de otimização em dois níveis e algoritmo de caminho mais curto
[10]	Fiscalização de peso	Modelo de otimização em dois níveis e heurística Lagrangiana
[32]	Fiscalização de peso	Modelo de otimização em dois níveis e algoritmo baseado na relaxação Lagrangeana
[33]	Fiscalização de velocidade	Abordagem heurística baseada em algoritmo guloso
[34]	Informações sobre tráfego	Implementação de ferramenta sobre tráfego
[18]	Fiscalização de peso	Estatísticas descritivas dos dados de estações existentes
[35]	Fiscalização de peso	Algoritmo heurístico Lagrangiano
[36]	Contagem de fluxo	Meta-heurística colônia de formigas e soluções de Pareto
[37]	Contagem de fluxo	Algoritmo híbrido progressivo com estrutura de cobertura de conjunto
[38]	Contagem de fluxo	Sistema estocástico linear discreto

Fonte: Os autores.

Dentre os estudos selecionados para análise, foi dada maior ênfase aos que tratavam especificamente sobre modelos de otimização da localização de equipamentos de fiscalização de peso, pelo fato de considerarem a tendência evasiva dos motoristas. Conforme uma pesquisa realizada na Polônia a respeito desses sistemas, um dos principais obstáculos enfrentados é a evasão dos motoristas que desejam evitar a vigilância. Isso ocorre principalmente pelo fato de os locais de instalação serem permanentes, o que permite a memorização desses pelos viajantes, os quais tendem a optar por rotas alternativas [18].

Entre esses estudos, destaca-se o modelo de Marković et al. [10], pela formulação matemática do EFCP. Nessa pesquisa, foram formuladas versões determinísticas e estocásticas do EFCP e proposto um modelo de otimização de dois níveis. O modelo de otimização de dois níveis é referente aos “líderes”, tomadores de decisão, e no segundo nível as equações referentes ao comportamento dos “seguidores”, motoristas, em relação às decisões tomadas pelos “líderes”. Nesse artigo, reduziu-se o modelo de dois níveis para somente um nível, através da premissa de que tanto o líder quanto os seguidores possuem o objetivo de minimizar a distância percorrida pelos veículos em situação ilegal. Com tal redução, obteve-se a solução por meio de uma heurística Lagrangiana.

Outra pesquisa, que utiliza o modelo de otimização de dois níveis como forma de resolver o EFCP, propõe uma abordagem baseada em condições de Karush-Kuhn-Tucker [12]. Os autores afirmam que existe uma distância máxima que os motoristas estão dispostos a percorrer para evadir a fiscalização, o que depende do lucro proveniente da prática da sobrecarga e do custo do desvio realizado. Divergindo dessa teoria, outro estudo [29] supõe que não existe um limite para a distância percorrida com o intuito de evasão. Logo, o modelo proposto neste, independe dos caminhos mais curtos, utilizando uma formulação baseada em enclaves onde as variáveis de decisão são associadas.

Corroborando com tal concepção, encontrou-se um estudo que utiliza o modelo de otimização de dois níveis com um cenário pessimista, supondo que os motoristas podem optar pelos maiores e mais onerosos caminhos a fim de evadir-se da fiscalização [11]. O modelo proposto é resolvido por meio de um algoritmo de plano de corte e os autores afirmam que formulações pessimistas podem evitar uma maior quantidade de danos à rede viária que aquelas que consideram uma limitação do caminho percorrido.

Portanto, existem diversas pesquisas a respeito da localização de fiscalização de peso que utilizam o modelo de otimização de dois níveis, porém, cada

uma com a sua peculiaridade. No caso de Arslan et al. [14], não é necessário o conhecimento prévio sobre a malha viária para a criação do modelo, sendo verificados os caminhos

possíveis durante a solução, à medida em que alternativas de localização são elaboradas. Isso permite que instâncias de diferentes tamanhos possam ser otimizadas.

Como resultado da revisão sistemática, também foram encontrados estudos sobre localização de fiscalização de peso que não utilizam o modelo de dois níveis [19, 23, 26, 35]. Alguns deles [19, 23] propõem processos hierárquicos analíticos para determinar um peso para cada estrada rural, com os seus atributos associados, como: geologia, clima, condições do terreno, infraestrutura disponível, custos de construção e demolição e grau de sobrecarregamento das rodovias [23]. No caso de [35], é proposto um algoritmo heurístico Lagrangiano, combinado com um problema de p-mediana, enquanto [26] propõe um modelo simplificado de interceptação de fluxo determinístico para a resolução do problema.

Além das metodologias de localização de monitoramento de peso, foram encontrados também estudos a respeito da alocação de outros tipos de fiscalização, como é o caso de [28], que aborda o problema de máxima cobertura de roteamento de patrulha, o qual objetiva maximizar a cobertura de policiamento através do posicionamento de patrulhas policiais. Utilizando um modelo de programação linear inteira mista e um algoritmo heurístico, a conclusão obtida foi que existe um aumento da eficiência do policiamento quando o roteamento possui diferentes pontos de início, não apenas uma base de operações.

Outro dispositivo de fiscalização relevante para a segurança nas rodovias é o detector de excesso de velocidade. Um estudo sobre o assunto [33] utiliza uma abordagem matemática com o intuito de distribuir esses equipamentos, encontrando o número ideal de sensores portáteis para a melhor cobertura possível da malha rodoviária. Diferente da aferição de velocidade, encontrou-se uma pesquisa a res-

peito da distribuição de locais para inspeção dos níveis de emissão de gases nos veículos. Para isso, foi utilizado um modelo de programação matemática não linear, resolvido por algoritmo genético, o qual leva em consideração o número de agentes fiscalizadores disponíveis e a quantidade de vagas disponibilizadas para os veículos fiscalizados [25].

Outro tipo de equipamento de grande importância nas rodovias é o sensor de contagem de fluxo, o qual tem o intuito de caracterizar o tráfego rodoviário, trazendo informações valiosas para o planejamento da infraestrutura rodoviária. Nesse sentido, os estudos apresentados em [20, 21, 22, 24, 27, 30, 36, 37 e 38] abordam a localização desses dispositivos.

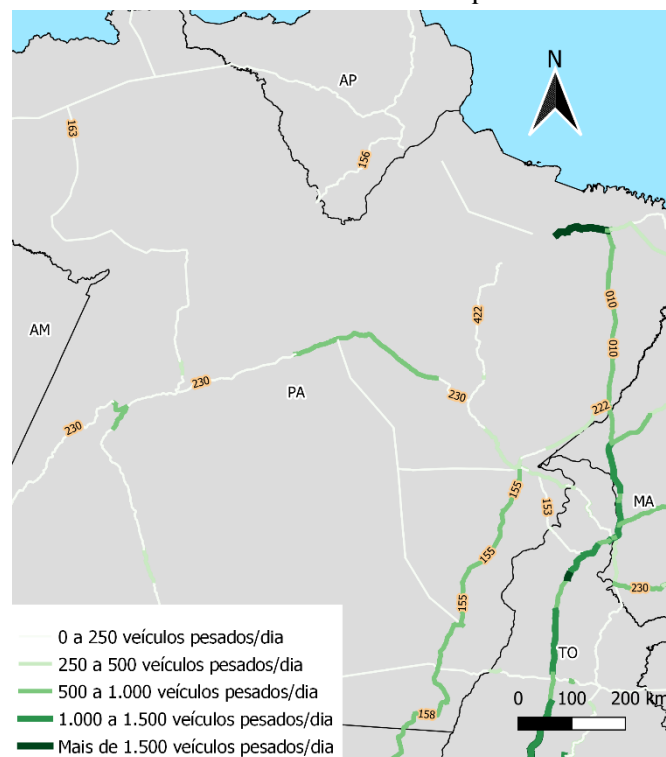
Além da localização de equipamentos rodoviários através de modelos de otimização, destaca-se uma pesquisa que utilizou SIG (Sistema de Informação Geográfica) para desenvolver um sistema de informações viárias na Índia [34]. O objetivo do estudo era preparar um mapa com todas as informações de tráfego e infraestrutura rodoviária, a fim de auxiliar na alocação de recursos para o desenvolvimento do estado.

Vistos os modelos de localização multicritérios [19, 23] e o sistema que utiliza informações geográficas [34], se destaca a metodologia do IVFP (Índice de Viabilidade de Fiscalização de Peso) [40], utilizada no Brasil, a qual não foi resultante do processo de revisão sistemática, porém alia ambos os conceitos. O IVFP consiste em um índice unificado que agrega diversas variáveis, como volume de veículos pesados, proximidade de áreas urbanas, condições do pavimento, presença de corredores logísticos, entre outros. Esse índice permite a comparação entre diferentes trechos rodoviários, a fim de apoiar no processo de decisão dos locais mais indicados para a implantação de postos de pesagem.

3. Estudo de caso: aplicação de modelos na malha rodoviária do estado do Pará

Com base nos resultados obtidos através da revisão sistemática, optou-se por implementar os modelos propostos em Marković et al. [10] e Arslan et al. [14], com algumas adaptações para a aplicação na malha rodoviária do estado do Pará. A escolha da malha para o estudo se dá pela menor complexidade da sua composição, o que permite a maior flexibilidade na implementação dos métodos de otimização. Na **figura 1** encontra-se o mapa do Pará, com os trechos rodoviários classificados de acordo com o volume de veículos pesados, conforme dados do Programa Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) [41].

Fig 1 - Mapa do estado do Pará com destaque nos trechos de maior volume de veículos pesados.

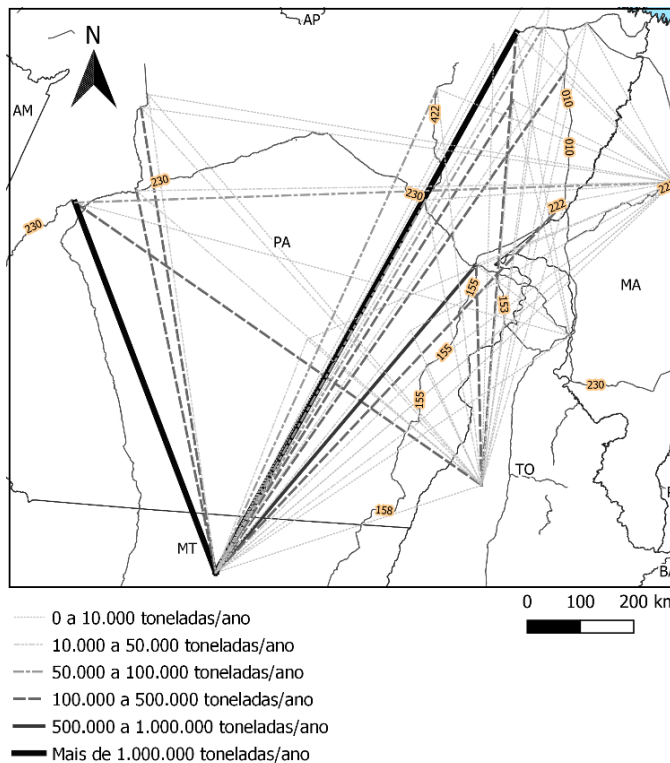


Fonte: [41] modificado pelos autores.

Observando a **figura 1**, percebe-se que os maiores volumes de veículos pesados se concentram na região leste do estado. Nota-se também outros volumes na parte mais central do mapa, porém com característica de fluxos locais, devido ao fato de não terem continuidade ao longo da rodovia.

A **figura 2** ilustra os principais fluxos de carga do estado, conforme dados de matriz origem-destino (OD) publicados pela EPL em 2016, projetados para 2020 [42].

Fig. 2 - Mapa do estado do Pará com destaque aos fluxos de carga mais significativos



Fonte: [42] modificado pelos autores.

Com base na **figura 2**, acredita-se que a maior parte dos fluxos são provenientes dos estados do Maranhão, Tocantins e Mato Grosso, com destino ao porto de Belém, e também ao contrário, do porto de Belém com direção a esses estados.

A escolha dos modelos [10] e [14] para implementação no presente estudo de caso deu-se devido ao fato desses

considerarem o comportamento evasivo dos transportadores, tendo o primeiro proposto o EFCP e o segundo capaz de resolver o problema de forma exata sem a necessidade de cálculo prévio das rotas para a malha viária analisada.

Após a realização do estudo e compreensão a respeito dos modelos, esses foram implementados em Python e neles foram inseridas outras restrições, adaptando-os à realidade das rodovias brasileiras. As restrições personalizadas implementadas foram:

- Possibilidade de otimizar a localização de novos postos de pesagem, considerando que já existam sistemas semelhantes na malha viária, ou fixando locais já selecionados;
- Impossibilidade de alocar postos em arcos inválidos, ou seja, desconsiderar no processo de otimização os trechos rodoviários que não podem comportar postos de fiscalização;
- Possibilidade de utilizar um mesmo equipamento de pesagem nos dois sentidos da rodovia. Essa restrição pode ser utilizada em casos de análises em rodovias de pistas simples, por exemplo, onde seria inviável, economicamente, ser instalado um equipamento de fiscalização em apenas um dos sentidos.

Nas **equações (1) a (6)** estão explicitadas a função objetivo e as restrições do primeiro modelo de referência [10]. Já nas **equações (7) a (9) e (16) a (18)** encontram-se as restrições personalizadas inseridas aos modelos. Ressalta-se que, para o primeiro modelo, os menores caminhos entre os fluxos da malha foram calculados através da aplicação do algoritmo Dijkstra, assim como o realizado no estudo de referência [10].

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij} w_{ij} + \sum_{f \in F} \sum_{p \in P_f} z_f^p c_f^p \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{(i,j) \in A_f^p} x_{ij} \geq y_f^p \quad \forall f \in F, p \in P_f \quad (2)$$

$$z_f^p \leq 1 - y_f^p \quad \forall f \in F, p \in P_f \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_f^p} x_{ij} \leq |A_f^p| \cdot y_f^p \quad \forall f \in F, p \in P_f \quad (4)$$

$$y_f \leq y_f^p \quad \forall f \in F, p \in P_f \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P_f} z_f^p \geq 1 - y_f^p \quad \forall f \in F \quad (6)$$

$$x_{ij} = 1 \quad \forall (i,j) \in A^D \quad (7)$$

$$x_{ij} = 0 \quad \forall (i,j) \in A^I \quad (8)$$

$$x_{ij} = x_{ji} \quad \forall (i,j) \in A^S \quad (9)$$

Onde:

A – Conjunto de arcos definidos pelo par de nós de origem (i) e destino (j);

A^D – Conjunto de arcos (i,j) pré-definidos para a existência de fiscalização de peso;

A^I – Conjunto de arcos (i,j) considerados inválidos para a alocação de equipamentos de fiscalização;

A^S – Conjunto de arcos (i,j) nos quais a pesagem pode ser realizada nos dois sentidos da via com um único sistema;

A^p – Conjunto de arcos (i,j) ao longo do caminho p ∈ P_f do fluxo f ∈ F;

c_f^p – Custo do dano associado ao fluxo não-fiscalizado f que percorre através do caminho p;

F – Conjunto de fluxos f, definidos por nós de origem e destino e volume do fluxo;

P_f – Conjunto de caminhos possíveis p através da malha para um determinado fluxo f;

w_{ij} – Custo de implementação de um posto de fiscalização no arco (i,j);

x_{ij} – Variável binária que adota o valor 1 quando existe um posto de fiscalização no arco (i,j) e 0 caso contrário;

y_f^p – Variável binária que adota o valor 1 quando existe pelo menos um posto de fiscalização ao longo do caminho p ∈ P_f do fluxo f ∈ F e 0 caso contrário;

y_f – Variável binária que adota o valor 1 quando existe pelo menos um posto de fiscalização ao longo de todos os caminhos p ∈ P_f e 0 caso contrário;

Z_f^p – Variável binária que adota o valor 1 caso o fluxo de viagem não seja interceptado ao longo do caminho p ∈ P_f do fluxo f ∈ F e 0 caso contrário.

Na **equação 1**, função objetivo, acontece a minimização do custo de implantação de postos de fiscalização de peso e dos danos excessivos gerados pelos veículos com sobrepeso. Nas **equações 2, 3 e 4**, encontram-se as primeiras restrições, que arbitram: sempre que houver pelo menos um sensor em um arco da malha rodoviária, (x_{ij} ≥ 1) ao longo de um fluxo (y_f^p = 1), o fluxo será considerado capturado (z_f^p = 0). A quarta restrição, **equação 5**, impõe que y_f só assumirá valor 1 se todos os caminhos de um fluxo forem cobertos com pelo menos um sensor de pesagem. Já na **equação 6**, última restrição, são selecionados somente os fluxos de viagem não interceptados (z_f^p = 1), a fim de utilizá-los no cálculo da variável de dano excessivo no pavimento.

A respeito das restrições personalizadas, a **equação 7**, coincidente com a **equação 16**, arbitra que a variável x_{ij} assumirá valor 1, caso o arco (i,j) esteja contido no conjunto de arcos pré-definidos para a fiscalização. As **equações 8 e 17** indicam que x_{ij} será igual a zero caso o arco (i,j) esteja contido no conjunto de arcos inválidos, nos quais não é possível o posicionamento de sistemas de fiscalização. Já as **equações 9 e 18** determinam que x_{ij} assumirá o mesmo valor que x_{ji} quando o mesmo sistema de pesagem precisar abranger os sentidos da rodovia.

Em seguida, encontram-se as equações do segundo modelo referência [14].

$$\min \sum_{(i,j) \in A} w_{ij} x_{ij} + \sum_{f \in F} \sum_{(i,j) \in A_f} c_f d_{ij} r_{ij}^f \quad (10)$$

s.a.

$$1 - \sum_{(i,j) \in A^p} x_{ij} \leq u_f \quad f \in F, p \in P_f \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sum_{(i,j) \in A_f} r_{ij}^f &= \{u_f \quad \text{se } i \\ &= s_f - u_f \quad \text{se } i \\ - \sum_{(j,i) \in A_f} r_{ji}^f &= t_f \quad \text{0 caso contrária} \end{aligned} \quad (12)$$

$$f \in F, i \in N_f$$

$$r_{ij}^f \leq 1 - x_{ij} \quad f \in F, (i,j) \in A_f \quad (13)$$

$$u_f, r_{ij}^f \geq 0 \quad f \in F, (i,j) \in A_f \quad (14)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (i,j) \in A \quad (15)$$

$$x_{ij} = 1 \quad \forall (i,j) \in A^D \quad (16)$$

$$x_{ij} = 0 \quad \forall (i,j) \in A^I \quad (17)$$

$$x_{ij} = x_{ji} \quad \forall (i,j) \in A^S \quad (18)$$

Onde:

A_f – Conjunto de arcos do menor caminho possível para o fluxo f ;

A^D – Conjunto de arcos (i,j) pré-definidos para a existência de fiscalização de peso;

A^I – Conjunto de arcos (i,j) considerados inválidos para a alocação de equipamentos de fiscalização;

A^S – Conjunto de arcos (i,j) nos quais a pesagem pode ser realizada nos dois sentidos da via com um único sistema;

c_f – Dano unitário causado pelo fluxo $f \in F$;

d_{ij} – Comprimento do arco $(i,j) \in A$;

N_f – Conjunto de nós que compõem o menor caminho possível para o fluxo $f \in F$;

r_{ij}^f – Variável binária que adota o valor 1 caso o arco $(i,j) \in A$ for percorrido pelo fluxo $f \in F$; e 0 caso contrário;

S_f – Nó de origem do fluxo $f \in F$;

t_f – Nó de destino do fluxo $f \in F$;

u_f – Variável binária que adota o valor 1 caso o fluxo de viagem não seja interceptado ao longo do fluxo $f \in F$ e 0 caso contrário;

x_{ij} – Variável binária que adota o valor 1 quando existe um posto de fiscalização no arco da malha e 0 caso contrário;

w_{ij} – Custo de instalação de um posto de fiscalização no arco (i,j) .

O modelo possui como função objetivo **equação 10** a minimização dos danos na infraestrutura, causados pela prática de sobrepeso não interceptada, mas também a minimização dos custos com instalação de sensores de pesagem. A respeito das restrições, a representada na **equação 11** mantém a variável u_f binária, assumindo o valor 1 se o fluxo não for interceptado, ou seja, se algum dos caminhos entre os nós origem e destino do fluxo não possuir fiscalização ($x_{ij}=0$). A **equação 12** define a continuidade dos fluxos, assegurando que os caminhos através da malha sejam compostos por arcos em sequência, partindo da origem até o destino de cada fluxo. Já a **equação 13**, restringe a seleção apenas aos arcos percorridos pelos fluxos em análise, enquanto a **equação 14** é uma restrição de não negatividade das variáveis u_f e r_{ij}^f . A **equação 15** representa o domínio da variável x_{ij} e, por fim, as **equações 16 a 18**, restrições personalizadas, foram citadas anteriormente.

Esse modelo, segundo Arslan [14], é acompanhado de um algoritmo de branch-and-cut, com geração de restrições personalizadas ao longo da solução. As restrições personalizadas, com as equações propostas no artigo, garantem que serão verificados os caminhos possíveis para os fluxos evasivos, calculando esses caminhos durante a geração de alternativas de solução para o problema. Já o algoritmo de branch-and-cut trata-se do algoritmo de branch-and-bound associado a planos de corte, os quais ramificam o problema. Logo, a função objetivo é dividida

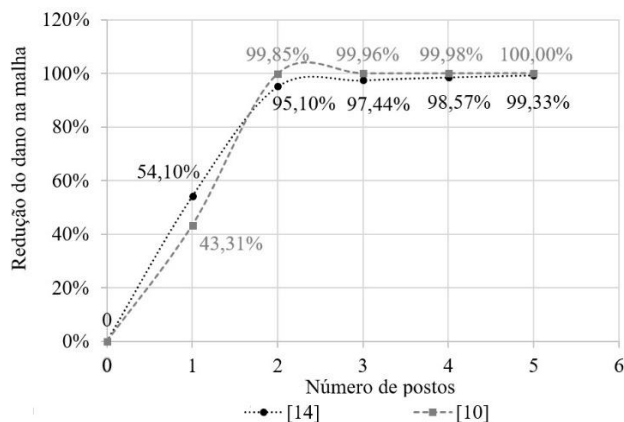
em subproblemas menores, chamados “nós da árvore” e em cada nó, são gerados cortes, fazendo com que os subproblemas gerem melhores limites duais.

Finalizada a implementação computacional do modelo, analisou-se a malha viária do estado do Pará. Cabe ressaltar que a tolerância considerada para os caminhos percorridos pelos transportadores foi de 20%, ou seja, admitiu-se que não serão feitos desvios superiores à 1,2 vezes o caminho mais curto entre os pares OD.

Como parâmetro de análise dos modelos, foi escolhido o percentual de redução de dano na malha rodoviária. Sabe-se que a prática do sobrepeso causa danos na infraestrutura, logo, é almejado que esses danos sejam reduzidos o máximo possível. Para o cálculo do dano causado pelos veículos sobrecarregados, multiplicou-se o volume estimado pela distância percorrida para cada um dos fluxos de tráfego da malha do estado. Sendo realizado o cálculo de forma específica para os fluxos capturados e não-capturados, quando instalados postos de fiscalização. Assim, foi possível identificar o percentual de redução de dano mediante a colocação dos sensores.

Na **figura 3** encontra-se um gráfico que indica o percentual de redução de dano alcançado com a adição de postos de fiscalização, para os dois modelos implementados.

Fig. 3 - Gráfico de percentual de redução de dano na malha de acordo com o número de postos de pesagem alocados na malha do Pará.



Fonte: Os autores.

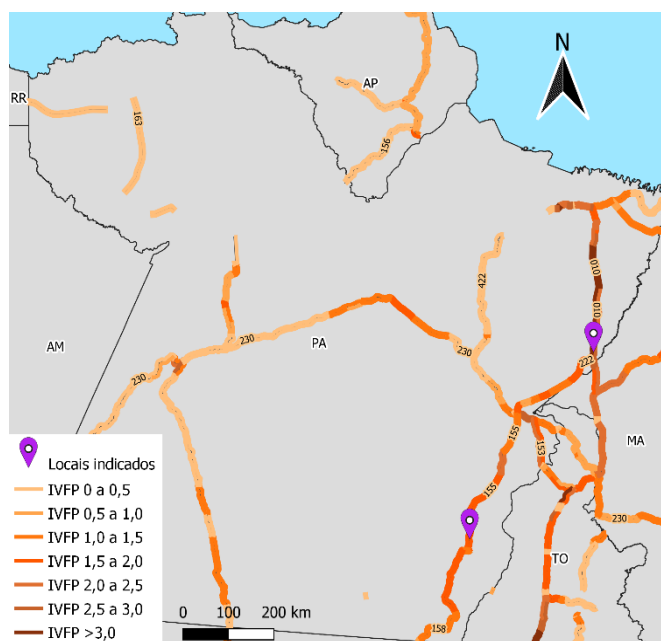
Observando a **figura 3**, percebe-se que os resul-

tados dos dois modelos testados são bastante semelhantes, o que sugere que ambos são eficazes para a otimização de fiscalização. Porém o modelo, de Arslan [14] possui menor custo computacional, devido ao fato de não necessitar da geração prévia das rotas dos fluxos considerados.

Outra observação pertinente é a quantidade ótima de postos para o monitoramento da malha rodoviária. Percebe-se que, para o caso analisado, dois postos seria o ideal, pois assim é obtida uma grande redução do dano, superior a 95% em ambos os modelos de otimização. Alocando-se uma quantidade superior, o benefício em termos de redução de custo do sobrepeso é menor, não compensando os custos de implantação de equipamentos. Cabe ressaltar que a malha rodoviária do estado do Pará é pouco complexa, necessitando de uma quantia pequena de postos de pesagem para obter uma boa cobertura.

Com base nessas considerações, optou-se pela alocação de dois postos de fiscalização de peso no local de estudo, evidenciados na **figura 4**.

Fig. 4 - Mapa do estado do Pará, com destaque nos trechos de maior IVFP e nos locais indicados para receber postos de pesagem.



Fonte: Os autores.

Destaca-se que os trechos com maior valor de IVFP [40] possuem maior relevância para a fiscalização de peso. Mesmo o IVFP não considerando as possíveis rotas de evasão, percebe-se na **figura 4** que os locais indicados através da aplicação dos modelos de otimização encontram-se em locais com elevado IVFP, o que sugere que essa metodologia, aliada com modelos de otimização que considerem a evasão, são ferramentas consistentes para o planejamento de infraestrutura de inspeção de peso.

Observando a caracterização do tráfego do estado - localização dos volumes de veículos pesados **figura 1** e localização dos fluxos de carga **figura 2** – percebe-se que os postos sugeridos encontram-se nos locais de maior densidade de veículos pesados do estado, o que indica a coerência dos modelos de otimização em localizar os principais pontos para instalação dos equipamentos de fiscalização.

4. Conclusão

O objetivo geral deste trabalho foi a aplicação de modelos de otimização da localização de equipamentos de fiscalização de peso. Para isso, foi realizado um estudo de caso na malha rodoviária do estado do Pará, a partir do qual concluiu-se que com poucos sensores, colocados em locais estratégicos e otimizados, pode-se obter uma redução satisfatória do dano causado por veículos com sobrepeso na infraestrutura.

Além disso, salienta-se que a revisão sistemática realizada cumpriu o objetivo proposto, que era destacar os principais modelos de localização de equipamentos de fiscalização utilizados nacional e internacionalmente. Nessa revisão, localizou-se estudos sobre instalação de sensores de contagem de fluxo, controle

de peso, de velocidade e de emissões veiculares, dentre outros, com diferentes metodologias de resolução para os problemas propostos.

Além disso, observa-se que a metodologia do IVFP aliada a modelos de otimização que considerem a tendência evasiva dos transportadores, pode representar uma alternativa interessante para o auxílio na tomada de decisão em relação a alocação de postos de fiscalização do tráfego.

Considerando que a prática evasiva dos motoristas é uma realidade pertinente, nota-se que é necessário levar esse fato em consideração quando o equipamento alocado tiver como objetivo a fiscalização. Essa consideração, ainda na fase de planejamento, não irá aumentar os custos de instalação, mas sim otimizar os locais escolhidos para a instalação dos dispositivos, o que minimizará a ocorrência de desvios curtos, que facilitam a fuga dos infratores.

Por fim, considerando o impacto negativo causado pela tendência evasiva dos condutores em situação ilegal em diversos aspectos, acredita-se que é pertinente a criação de redes de pontos de monitoramento que levem em consideração a realidade das rodovias brasileiras e a tendência evasiva, a fim de auxiliar os gestores da infraestrutura de transportes na tomada de decisão e aumentar a eficácia da fiscalização de tráfego.

Agradecimentos

Os autores são gratos pelo apoio do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), cujo interesse no assunto motivou a realização deste estudo. Os autores também agradecem à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por viabilizar essa pesquisa.

Referências

- [1] V. Ghisolfi, G. M. Ribeiro, G. L. D. Chaves, R. F. Orrico Filho, I. C. S. Hoffmann e L. R. Perim (2019). “Evaluating Impacts of Overweight in Road Freight Transportation: A Case Study in Brazil with System Dynamics.” *Sustainability*, v. 11, p. 3128. DOI: 10.3390/su11113128.
- [2] B. Jacob e V. F. L. Beaumelle (2010). “Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology.” *IATSS Research*, v. 34, n. 1, p. 9–15. DOI: 10.1016/j.iatssr.2010.06.003.
- [3] G. G. Otto, L. Franceschi, L. F. G. Dellaroza, V. Z. Tani e A. M. Valente. (2019) Impacts of the Lack of Weight Enforcement on Maintenance Costs of the Brazilian Roadway Network. *Proceedings of the 8th International Conference on Weight-In-Motion*.

- [4] Brasil, “Boletim Estatístico”, Confederação Nacional dos Transportes, Brasília, DF, 2019. [Online]. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/boletins>
- [5] I. C. M. Pacheco. “Sistema Especialista Para Monitoramento Da Operação Dos Equipamentos De Fiscalização Eletrônica De Velocidade” (2011). Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [6] E. Bernardi. “Os sistemas de identificação veicular, em especial o reconhecimento automático de placas” (2015). Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2015. doi:10.11606/D.3.2016.tde-11052016-162646. Acesso em: 2021-09-28.
- [7] B. H. Cottrell Jr. (1992). “The Avoidance of Weigh Stations in Virginia by Overweight Trucks”. Virginia Transportation Research Council, Charlottesville.
- [8] W. Cunagin, W. A. Mickler e C. Wright (1997). “Evasion of Weight-Enforcement Stations by Trucks.” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1570, n.1, p. 181–190. DOI: 10.3141/1570-21.
- [9] J. G. Strathman, e G. Theisen (2002). “Weight enforcement and evasion: Oregon case study”.
- [10] N. Marković, I. O. Ryzhov, e P. Schonfeld, “Evasive flow capture: Optimal location of weigh-in-motion systems, tollbooths, and security checkpoints”, *Networks*, vol. 65, no 1, p. 22–42, jan. 2015, doi: 10.1002/net.21581.
- [11] A. Bogyrbayeva e C. Kwon. Pessimistic evasive flow capturing problems. *European Journal of Operational Research*, v. 293, n. 1, p. 133–148, ago. 2021.
- [12] F. Hooshmand e S.A. Mirhassani. An Effective Bilevel Programming Approach for the Evasive Flow Capturing Location Problem. *Networks and Spatial Economics*, v. 18, n. 4, p. 909–935, 1 dez. 2018.
- [13] L. Franceschi, G. G. Otto, L. Kaesemodel, e A. M. Valente, “Effects of drivers’ evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems”, *TRANSPORTES*, vol. 28, no 5, p. 235–251, dez. 2020, doi: 10.14295/transportes.v28i5.2233.
- [14] O. Arslan, O. Jabali e G. Laporte. Exact Solution of the Evasive Flow Capturing Problem. *Operations Research*, v. 66, n. 6, p. 1625–1640, nov. 2018.
- [15] S. Mitchell, M. O’Sullivan e I. Dunning. “PuLP: A Linear Programming Toolkit for Python”, Department of Engineering Science, The University of Auckland, 2011, [Online]. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.416.4985>.
- [16] H. G. Santos, T. A. M. Toffolo. “Tutorial de desenvolvimento de métodos de programação linear inteira mista em python usando o pacote Python-MIP”, Department of Computing, Federal University of Ouro Preto (UFOP), 2019, [Online]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338418061_Tutorial_de_desenvolvimento_de_metodos_de_programacao_linear_inteira_mista_em_python_usando_o_pacote_Python-MIP
- [17] M. C. De-La-Torre-Ugarte-Guanilo, R. F. Takahashi e M. R. Bertolozzi. “Revisão sistemática: noções gerais”. *Revista da Escola de Enfermagem da USP*, v. 45, n. 5, p. 1260-1266, 2011.
- [18] A. Rygula, K. Brzozowski e A. Maczyński. Limitations of the effectiveness of Weigh in Motion systems. *Open Engineering*, v. 10, n. 1, p. 183-196, 17 mar. 2020.
- [19] V. Ammarapala, T. Chinda, P. Udomworarat, T. Rongwiriyanich, A. Khampanit, S. Suanmali e B. Samphanwattanachai. Selection of weigh station locations in Thailand using the analytic hierarchy process. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 2013.
- [20] G. Climaco, P.H. González, G.M. Ribeiro, G.R. Mauri e L. Simonetti. A Biased Random-Key Genetic Algorithm for the Traffic Counting Location Problem. 2019 8th Brazilian Conference on Intelligent Systems (BRACIS). *Anais...IEEE*, out. 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8923993/>
- [21] P.H. González, G. Climaco, G.R. Mauri, B.S. Vieira, G.M. Ribeiro, R.D. Orrico Filho, L. Simonetti, L.R. Perim e I.C.S. Hoffmann. New approaches for the traffic counting location problem. *Expert Systems with Applications*, v. 132, p. 189–198, out. 2019.
- [22] K. Hyun, A. Tok e S.G. Ritchie. Long distance truck tracking from advanced point detectors using a selective weighted Bayesian model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 82, p. 24–42, set. 2017.
- [23] J. Jinyu, Z. Xu, Y. Zhongzhen. Locating Control Stations for Mobile Monitoring of Overloaded Trucks on Rural Highways. *IEEE Access*, v. 8, p. 65821–65829, 2020.
- [24] I. Jovanović, M. Šelmić e M. Nikolić. “Metaheuristic approach to optimize placement of detectors in transport networks — case study of Serbia”. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 46, n. 3, p. 176-187, mar.

- 2019.
- [25] T. Konstantinou, K. Kepaptsoglou, P. Kopelias. “Mobile vehicle emission inspection service optimization: a flow intercepting location model and application”. *Transportation Planning and Technology*, v. 43, n. 2, p. 174–187, 17 fev. 2020.
- [26] M. Kulović, Z. Injac, S. Davidović e I. Posavac. “Modelling Truck Weigh Stations’ Locations based on Truck Traffic Flow and Overweight Violation: A Case Study in Bosnia and Herzegovina”. *PROMET - Traffic&Transportation*, v. 30, n. 2, p. 163–171, 20 abr. 2018.
- [27] P. Kuusela, I. Norros, J. Kilpi e T. Raty. “Origin-destination matrix estimation with a conditionally binomial model”. *European Transport Research Review*, v. 12, n. 1, p. 43, 17 dez. 2020.
- [28] S. Li, B. B. Keskin, Bi-criteria dynamic location-routing problem for patrol coverage. *Journal of the Operational Research Society*, v. 65, n. 11, p. 1711–1725, 21 nov. 2014.
- [29] C-C. Lu, S. Yan, H-C. Ko e H-J. Chen. “A Bilevel Model with a Solution Algorithm for Locating Weigh-In-Motion Stations”. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 19, n. 2, p. 380-389, fev. 2018.
- [30] X. Luo, L. Niu e S. Zhang. “An Algorithm for Traffic Flow Prediction Based on Improved SARIMA and GA”. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 22, n. 10, p. 4107-4115, 31 out. 2018.
- [31] A. Mahmoudabadi e S. M. Seyedhosseini. “Improving the efficiency of weigh in motion systems through optimized allocating truck checking oriented procedure”. *IATSS Research*, v. 36, n. 2, p. 123-128, mar. 2013.
- [32] N. Marković, I. O. Ryzhov, e P. Schonfeld. “Evasive flow capture: A multi-period stochastic facility location problem with independent demand”. *European Journal of Operational Research*, v. 257, n. 2, p. 687-703, mar. 2017.
- [33] M. Owais, M. El Deeb, e Y. A. Abbas. “Distributing Portable Excess Speed Detectors in AL Riyadh City”. *International Journal of Civil Engineering*, v. 18, n. 11, p. 1301-1314, 2020.
- [34] S. Pal. “Application of GIS in Road Information System—An Experience with State Highways of West Bengal”. In: J. K. Ghosh; I. da Silva (Orgs.); *Applications of Geomatics in Civil Engineering*. v. 33. Singapore: Springer Singapore, 2020. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-981-13-7067-0_32. Acesso em: 13 set. 2021.
- [35] F. Sayyady, Y. Fathi, G. F. List e J. R. Stone. “Locating Traffic Sensors on a Highway Network”. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2339, n. 1, p. 30–38, 1 jan. 2013.
- [36] D. Sun, Y. Chang e L. Zhang. “An ant colony optimization model for traffic counting location problem”. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, v. 165, n. 3, p. 175-185, ago. 2012.
- [37] B. S. Vieira, T. Ferrari, G. M. Ribeiro, L. Bahiense, R. D. Orrico Filho, C. A. Abramides e N. F. R. Campos Júnior. “A progressive hybrid set covering based algorithm for the traffic counting location problem”. *Expert Systems with Applications*, v. 160, p. 113641, dez. 2020.
- [38] C-J. Wu, T. Schreiter e R. Horowitz. “Multiple-clustering ARMAX-based predictor and its application to freeway traffic flow prediction”. (2014) *American Control Conference*. Anais... IEEE, jun. 2014. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6859388/>.
- [39] H. V. Stackelberg (1952). “The Theory of the Market Economy. Oxford University Press”.
- [40] L. Franceschi, G. G. Otto, L. Kaesemodel, e A. M. Valente, “Elaboração de um processo multicritérios para apoio á localização de postos de pesagem em malhas rodoviárias”. *Anais 33 Congresso Da ANPET-Balneário Camboriú-SC*. 2019.
- [41] BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. *Estimativa do Volume Médio Diário Anual - VMDA*. Disponível em: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnt/Modelagem>. Acesso em: 18 abr. de 2022. 2019.
- [42] Empresa de Planejamento e Logística - EPL. *Matrizes do transporte inter-regional de carga do Brasil, 2016*. Disponível em: <https://www.epl.gov.br/matrizes-do-transporte-inter-regional-de-carga-no-brasil>>. Acesso em: 18 abr. 2022.