

FERRAMENTA DE AUXÍLIO A TOMADA DE DECISÃO PARA LOCAÇÃO DE PÁTIO DE CRUZAMENTO FERROVIÁRIO

Rafael L. Witiuk

Fabiana B. von der Osten

Pontifícia Universidade Católica do Paraná

RESUMO

Um estudo locacional para a implantação de novo pátio de cruzamento depende de diversos stakeholders internos da ferrovia – engenharia, planejamento, operação, execução, regulatório e licenciamento ambiental – de variadas disciplinas de projeto e do contexto no qual o estudo ocorre, segundo as condições de investimento, saturação e prazo de execução da organização. Assim, se desenvolveu uma ferramenta de auxílio à decisão para locação de pátio definindo-se seis macroindicadores - geometria, custo de obra, impacto ambiental, posição na seção de bloqueio, risco de desapropriação e eficiência produtiva - e um modelo de decisão para a articulação destes parâmetros baseado na metodologia *Fuzzy-QFD*, que permite correlacionar uma grande quantidade de variáveis a partir de considerações linguísticas. Conforme estudo de caso, a ferramenta apresentou resultados satisfatórios tendo orientado a decisão para uma solução de pátio com custo 30% inferior no cenário de restrição orçamentária e capacidade 10% superior para o cenário de maximização da capacidade.

ABSTRACT

A locational study for the insertion of a new crossing yard depends on several internal stakeholders - engineering, planning, operation, enforcement, regulatory and environmental licensing - on various project disciplines and on the context in which the study takes place, according to the investment's conditions, saturation and railway's timescale. Thus, a decision-making tool was developed for crossing yard's locational study process, defining six indicators - geometry, construction cost, environmental impact, the distance between yards, risk of expropriation and productive efficiency - and a decision model for articulation of these parameters based on the *Fuzzy-QFD* methodology, which allows correlating many variables from linguistic considerations. According to the case study, the tool presented satisfactory results, guiding to a yard solution presenting 30% lower cost in the budget constraint's scenario and leading to another yard solution with capacity increased around 10% for the capacity maximization's scenario.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil vive um momento singular em matéria de transporte ferroviário, tendo em vista o início dos processos de renovação antecipada das concessões e os novos leilões de infraestrutura. Este contexto evidencia uma perspectiva de elevados investimentos no setor, principalmente em aumento de capacidade (ANTF, 2019). Dentre as estratégias de aumento de capacidade, destaca-se a construção de novos pátios de cruzamento ferroviário como uma alternativa de maior impacto na produtividade para o curto prazo e elevado retorno do investimento, tendo em vista o menor custo do pátio frente as demais soluções (ANTT, 2016).

A construção de novos pátios de cruzamento demanda a realização de estudos locacionais, em que o tomador de decisão busca definir o melhor posicionamento do pátio em função de aspectos como: as características dos possíveis pátios de cruzamento nas locações estudadas, as necessidades das partes interessadas e o contexto no qual será realizado o referido estudo.

Neste sentido, entende-se como características dos projetos de pátio as disciplinas de engenharia, os custos de implantação e os riscos do projeto. Em relação às necessidades dos *stakeholders* internos de uma ferrovia, têm-se os principais pontos de interesse das diferentes áreas que participam do projeto de implantação de um novo pátio, notadamente as áreas de engenharia, de planejamento, de operação, de execução de obra, de relações governamentais e de licenciamento ambiental. As características e as necessidades descritas estão correlacionadas, sendo que cada área apresenta um enfoque diferente em relação ao projeto.

Porém, a articulação destas duas frentes para as partes interessadas internas do projeto – setores da empresa – variam segundo o cenário em que a ferrovia se encontra. Ou seja, para uma operadora em que há retenção de gastos, parâmetros de custo apresentam maior importância quando comparado a outra, que esteja em processo de expansão, em que há mais interesse em maximizar os indicadores de aumento de capacidade.

Neste sentido, a racionalidade limitada e a multiplicidade de contextos que envolvem o referido estudo, comprometem a assertividade da tomada de decisão, haja vista a dificuldade em se articular os elementos citados – as características do projeto e os interesses de seus clientes – segundo os possíveis cenários. Ademais, dada a variedade de atores envolvidos no processo, pode não ocorrer entendimentos convergentes quanto à melhor solução de pátio ou podem ser obtidos resultados para os quais qualquer solução locacional é aparentemente adequada, o que evidencia a necessidade de metodologias capazes de comparar as soluções quantitativamente.

Tendo em vista a complexidade do estudo locacional descrita, a clara necessidade de construção de novos pátios de cruzamentos no médio prazo e a falta de metodologias e autores que deem enfoque ao tema, propõe-se, no presente trabalho, a criação de uma ferramenta de auxílio a tomada de decisão aplicada especificamente aos problemas de locação de pátio.

2. METODOLOGIA

Para tanto, foram criados seis macroindicadores apresentados no Quadro 1, que representam cada uma das características de projeto elencadas pelo autor a partir da experiência em campo e com base na bibliografia. Com o objetivo de definir os pesos que permitam avaliar a representatividade dos indicadores para cada cenário apresentado no Quadro 2, foi criado um modelo de decisão baseado na metodologia *Fuzzy-QFD*. Este modelo correlaciona os requisitos das partes interessadas – Quadro 3 – e as características dos pátios (macroindicadores) segundo os contextos possíveis, ponderando a importância de cada característica na tomada de decisão.

Quadro 1: Descrição dos macroindicadores definidos pelo autor

<i>Características técnicas (DR)</i>	<i>Sigla</i>	<i>Descrição</i>
Geometria	I _G	A geometria do pátio faz referência às curvas horizontais e às rampas. A geometria influencia diretamente os níveis operacionais do pátio e, por vezes, sua capacidade produtiva ao impor limitações de velocidade devido às curvas e rampas acentuadas
Custo de Obra	I _{CO}	O custo de obra faz referência aos principais elementos da curva ABC de um pátio de cruzamento ferroviário, como o custo da superestrutura do pavimento, de terraplenagem e das obras de interferência.
Impacto ambiental	I _A	O impacto ambiental é medido pela quantidade de supressão vegetal e pela quantidade de áreas de limitação que o pátio interfere, tais como perímetros urbanos, APAs, APPs, áreas indígenas e quilombolas.
Posição na SB	I _{SB}	Faz referência à posição que o pátio ocupa na seção de bloqueio em relação aos pátios subsequentes (centralidade) e à posição do AMV em relação às curvas situadas em sua proximidade.
Risco de Desapropriação	I _{RD}	São decorrentes da possibilidade de as obras ultrapassarem a faixa de domínio em função da implantação de acessos, passagens em desnível e alargamento de taludes.
Eficiência produtiva	I _{EPF}	Se refere ao potencial do pátio em permitir o aumento de capacidade, seja pela solução de passagens em nível ou pela otimização das seções de bloqueio resultantes.

De maneira acessória, foi estruturada uma metodologia de cálculo para estimar os custos de implantação de linha férrea, considerando os custos de superestrutura, solução de interferências e movimentação de massa. Ademais, foram definidos parâmetros para análise operacional das propostas de pátio de cruzamento ferroviário envolvendo as rampas, as curvas, os trechos de via singela resultantes, as restrições de via e os comprimentos de pátio em tangente. Para avaliar as interferências viárias, foi definida uma estratégia de cálculo considerando a faixa de domínio, os cortes e aterros, as soluções tipo de interferências e as distâncias para as pontas de aparelho de mudança de via (AMV). Estudou-se também, um método para a avaliação da agilidade de execução tendo em vista as áreas de preservação permanente (APP), as áreas de preservação ambiental (APA), os limites urbanos, as zonas de quilombolas, as demarcações indígenas e o risco de desapropriação.

Quadro 2: Descrição dos cenários definidos pelo autor

<i>Cenários</i>	<i>Descrição</i>
Imediatismo operacional	Quando ocorre a necessidade de implantação do pátio no tempo mais cedo possível em decorrência dos prazos impostos pelo planejamento estratégico da ferrovia.
Limitação orçamentária	Cenário no qual há poucos recursos para a implantação do projeto e devem ser adotadas as soluções mais austeras, ainda que com menor resultado em termos da produtividade do trecho.
Maximização da produção	Situações em que há grandes pressões de produtividade para o corredor ferroviário do modo que deve ser prevista a solução de pátio que proporcione o maior nível de serviço possível, ou seja, maximize o aumento de capacidade.

Quadro 3: Requisitos dos clientes do projeto, sua sigla e justificativa

<i>Requisito clientes (CR)</i>	<i>Sigla</i>	<i>Justificativa</i>
Agilidade de execução	CR1	Faz referência aos aspectos relacionados aos prazos de início de operação definidos pelo planejamento estratégico da organização. As principais características de interesse são os riscos de desapropriação e impacto ambiental que podem aumentar a duração do projeto.
Custo de Implantação	CR2	Representa o custo de projeto a ser executado pela área de implantação e engenharia, tem estreita relação com a característica de custo do projeto
Aspecto Ambiental	CR3	Considera o impacto ambiental da obra para o ecossistema da região e para as áreas urbanas existentes no entorno. É capitaneada pela área de licenciamento ambiental e relação governamental.
Aumento de Capacidade	CR4	Traduz os requisitos de aumento de produção decorrente da instalação do novo pátio de cruzamento ferroviário, sendo o principal interesse da área de planejamento e controle da produção.
Ganho Operacional	CR5	Leva em consideração os aspectos de melhoria operacional decorrente da instalação do pátio na posição apresentada, sendo a operação e o planejamento operacional as principais partes interessadas.

3. ESTUDO LOCACIONAL

A escolha do local de um pátio de cruzamento ferroviário é um processo de tomada de decisão em que se deve avaliar criteriosamente uma série de fatores. Rosa (2016) aponta 5 principais fatores, dos quais 3 se aplicam diretamente para um pátio de cruzamento: topografia do terreno; o fator social e ambiental; e as áreas urbanas. O presente estudo vai além ao definir seis principais temáticas relevantes, que ensejaram a criação de macroindicadores com o objetivo de avaliar quantitativamente o desempenho das propostas de pátio, cujo método de cálculo foi construído segundo parâmetros levantados na bibliografia e a partir da experiência de profissionais da área.

A utilização de indicadores especificamente desenvolvidos para a avaliação de pátios

ferroviários é uma abordagem já desenvolvida na literatura, a exemplo de Langoni (2006) que elaborou um conjunto de quatro indicadores para a avaliação operacional de pátios de classificação da Malha Regional Sudeste (MRS). A seguir, são apresentados os conceitos relevantes para cada um dos macroindicadores desenvolvidos e utilizados no modelo de decisão descrito ao longo do presente estudo.

3.1. Geometria do pátio (I_G)

O macroindicador “geometria do pátio” é resultado das operações *fuzzy* entre os indicadores de rampa e curva. A metodologia *fuzzy* foi adotada apenas para o indicador geometria com o objetivo de demonstrar sua aplicação para o caso estudado. Nos demais foram adotadas metodologias realizadas com auxílio de softwares comuns como o MS Excel[®]

O conceito da lógica *fuzzy* é baseado no uso de padrões linguísticos para definição das variáveis e a forma com a qual estas se relacionam, sendo uma estratégia de modelagem eficiente para situações em que as variáveis não são precisas ou apresentam elevado grau de incerteza (Zadeh, 1972). A referida imprecisão é justificada, por exemplo, pelo fato de a rampa máxima ser calculada como se a composição inteira estivesse contida em um trecho com esse nível de rampa, quando, na verdade, dificilmente isto ocorre tendo em vista o perfil vertical usualmente encontrado para as ferrovias. Portanto, entende-se no exemplo que a rampa máxima é principalmente uma referência a ser utilizada para o processo de locação de pátio.

Segundo Zadeh (1972) a abordagem linguística da teoria *fuzzy* permite atribuir características às variáveis conforme a cognição humana, a exemplo da variável *fuzzy* rampa apresentada no Gráfico 1a. Neste caso, observa-se que na zona de transição entre “leve” e “médio” ambas as atribuições recebem graus de pertinência intermediários, contrariando a noção booleana clássica ao assumir que a variável é caracterizada parcialmente como “leve” e “média”. Ou seja, supondo rampa máxima como sendo 0,625%, sua caracterização seria “leve” com grau de pertinência de 0,5 e “média” com grau de pertinência de 0,5.

Deste modo, foi adotado para as operações *fuzzy* o controlador proposto por Mandani (1973), em que são utilizados operadores *fuzzy* entre os antecedentes (rampa e curva) e as regras de inferência *fuzzy* para definir o consequente, ainda como um número *fuzzy*. Nesta abordagem o operador *fuzzy* utilizado foi do tipo máx-min conforme proposto pelo método, em que adota-se o operador mínimo (\wedge) para o conceito lógico “e”, operador máximo para o conceito lógico “ou” e a regra de implicação é do tipo se a “Rampa” é X e o “Grau de curva” é Y então “Geometria” é Z, conforme Quadro 4. A operação completa é portanto definida na Equação 1 em que μ_G , μ_R e μ_C são as funções de pertinência das variáveis geometria, rampa e grau de curva, respectivamente, e o índice i é a regra calculada para um conjunto de regras r .

$$\mu_G(x, y) = \max_{1 \leq i \leq r} [\mu_{R_i}(x) \wedge \mu_{C_i}(y)] \quad (1)$$

O resultado *fuzzy* obtido é então defuzzificado conforme o método do centro de gravidade definido pela Equação 2 e ilustrado no Gráfico 2b.

$$CG(G) = \frac{\int z \mu_G(z) dz}{\int \mu_G(z) dz} \quad (2)$$

3.1.1. Rampa

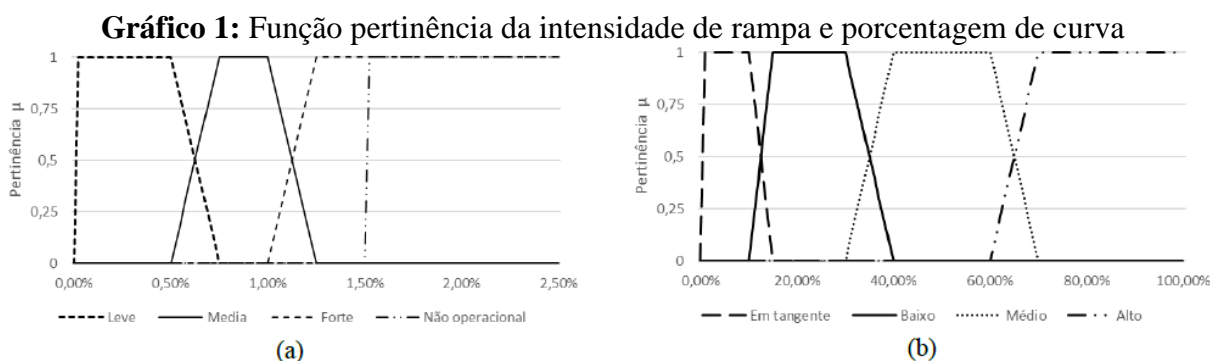
As rampas foram definidas conforme proposto pelo autor e segundo especialistas em rampas leves, rampas médias, rampas fortes e rampas não operacionais, conforme Gráfico 1a. A rampa limite varia segundo o trem-tipo utilizado no corredor, notadamente em função de sua massa total, da potência dos ativos de tração utilizados e do tipo de carga transportada

3.1.2. Curvas

As curvas horizontais correspondem aos elementos de ligação entre as tangentes definidas em projeto para permitir o contorno dos obstáculos naturais e ocupações humanas (Paiva, 2016). O cálculo do indicador de curva consiste basicamente na razão do comprimento em curva e em tangente do pátio estudado, conforme classificado na Figura 1b.

3.1.2. Cálculo do macroindicador geometria

A partir das funções de pertinência apresentadas no Gráfico 1 e da regra de inferência *fuzzy* apresentada no Quadro 1, pôde ser definida a variável *fuzzy* geometria composta de funções de pertinência trapezoidais caracterizadas como ótima, boa, média, ruim e péssima – Gráfico 2a.



Quadro 4: Regra de inferência *fuzzy* para a variável geometria

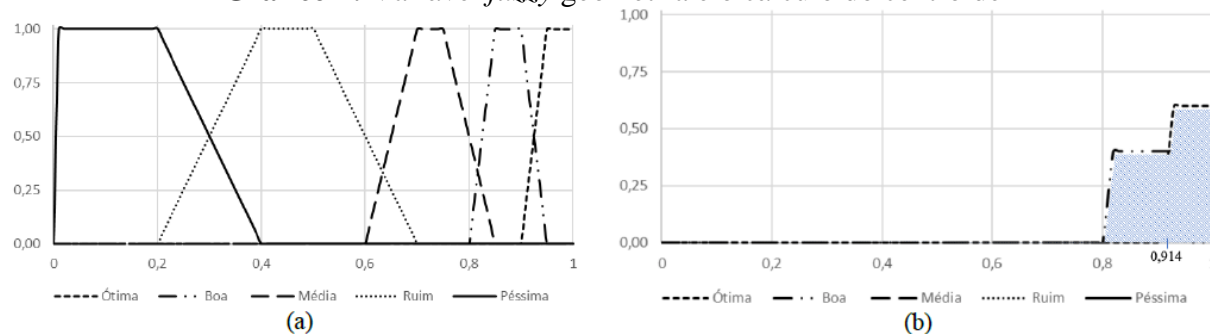
Rampa \ Grau de curva	Em tangente	Baixo	Médio	Alto
Leve	Ótima	Ótima	Ótima	Boa
Média	Boa	Boa	Boa	Média
Forte	Média	Ruim	Ruim	Ruim
Não operacional	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Péssimo

Caso a rampa máxima seja de 0,62% e grau de curva de 39% tem-se os graus de pertinência de rampa máxima como sendo $\mu_{R_{leve}} = 0,6$ e $\mu_{R_{média}} = 0,4$ assim como grau de pertinência de curva como sendo $\mu_{C_{médio}} = 0,9$ e $\mu_{C_{baixo}} = 0,1$. Após o cálculo de inferência *fuzzy* descrito abaixo tem-se o resultado da variável *fuzzy* geometria no Gráfico 2b., defuzificado pelo método do centroide obtém-se o resultado de 0,914 para o indicador geometria

$$\mu_{G_{ótima}} = \max_{1 \leq i \leq 2} [\mu_{R_{leve}}(0,6) \wedge \mu_{C_{baixo}}(0,1), \mu_{R_{leve}}(0,6) \wedge \mu_{C_{médio}}(0,9)] = 0,6$$

$$\mu_{G_{boa}} = \max_{1 \leq i \leq 2} [\mu_{R_{média}}(0,4) \wedge \mu_{C_{baixo}}(0,1), \mu_{R_{média}}(0,4) \wedge \mu_{C_{médio}}(0,9)] = 0,4$$

Gráfico 2: Variável *fuzzy* geometria e o cálculo do centroide



3.2. Custo de obras (I_{CO})

O macroindicador custo de obra (I_{CO}) foi definido como sendo a multiplicação dos resultados dos indicadores de base: custo de terraplenagem (I_T); custo de interferência (I_{Int}); e referencial de investimento (I_{RC}), como um parâmetro para reforçar o impacto do custo do pátio caso ultrapassa a referência adotada pelo tomador de decisão.

$$I_{CO} = I_T * I_{Int} * I_{RC} \quad (3)$$

3.2.1. Custo de terraplenagem

O custo de terraplenagem foi definido na Equação 4 em que I_{nc} é o volume não compensado, c_t é o custo de movimentação de massa, V_C o volume de corte, V_A é o volume de aterro, C_{TP} é o custo total de pátio, sendo o C_{Pav} o custo da superestrutura ferroviária e c_e é o custo de escavação. O referido custo foi estimado supondo uma distância média de transporte de 1.000 metros, devido a impossibilidade de se estimar adequadamente a posição das áreas de empréstimo, e adoção de uma plataforma média de 5 metros, que é a entrevista adotada. Foi utilizada a cota do trecho obtida a partir do computador de bordo da locomotiva e a cota do terreno conforme dados do Google Earth (2019).

$$I_T = \frac{1 - V_{nc} + c_t * 1000 + \text{Máx}(V_C; V_A) * c_e}{C_{TP}} \quad (4)$$

$$C_{TP} = C_{Pav} + I_{int} + I_T \quad (5)$$

3.2.2. Custo de interferência

É o somatório dos custos para a solução das interferências usualmente mais onerosas de um projeto de pátio de cruzamento dividido pelo custo total do pátio (C_{TP}), conforme Equação 6. Tais interferências são: as passagens superiores (C_{PS}); as passagens inferiores (C_{PI}); acessos (C_{Acesso}); as passagens em nível (C_{PN}); e as pontes (C_{Ponte}). Quando da presença de passagens em nível, admitiu-se como premissa de solução de interferência a execução de uma passagem superior.

$$I_{Int} = 1 - \frac{C_{PS} + C_{PI} + C_{Acesso} + C_{Ponte}}{C_{TP}} \quad (6)$$

3.2.3. Referencial de investimento

Já o referencial de custo de obra (I_{RC}) é dado segundo um parâmetro para a construção de linha férrea *brownfield*, de US\$ 1.000.000,00 por quilômetro adotado como referência pelo autor, podendo ser alterado conforme a política de investimentos da ferrovia. Este parâmetro deve ser dividido pelo custo total do pátio de cruzamento ferroviário (C_{TP}).

$$I_{RC} = \frac{US\$ 1.000.000,00}{C_{TP}} \quad (7)$$

3.3. Impacto ambiental (I_A)

Relaciona os indicadores de área de interesse ambiental e indicador de bacia hidrográfica (I_{Tal}), que contabiliza os talvegues cruzados pela ferrovia, conforme Equação 8 e Quadro 5

$$I_A = \frac{\text{Mín}(I_{APP}; I_{APA}) + I_{Tal} + \text{Mín}(I_{TI}; I_{TQ}) + I_{RV}}{4} \quad (8)$$

3.4. Posição na seção de bloqueio (I_{SB})

Este macroindicador tem como principal atribuição evitar que o pátio esteja situado próximo de zonas urbanas e tenha seus AMV locados a uma distância insuficiente em relação às curvas subsequentes, visando a garantia de sua segurança operacional. Neste sentido, o referido indicador é calculado a partir da Equação 9, em função dos indicadores apresentados no Quadro 6: posição do AMV (I_{DA}); raio da curva subsequente ao AMV (I_{RA}); limites urbanos próximos (I_{PU}); e centralidade do pátio (I_{Cen}).

$$I_{SB} = Média(I_{DA} * I_{RA}; I_{PU}; I_{CP}) \quad (9)$$

Quadro 5: Descrição dos indicadores de base de impacto ambiental (AGE; 2018)

Indicador	Sigla	Descrição	Equação
Terras indígenas	I_{TI}	A realização de empreendimentos em terras indígenas é condicionada à obtenção do licenciamento etnoambiental, o que retarda a obtenção da Licença Prévia de obra	Binário [0,1]
Terras quilombolas	I_{TQ}	A Lei 4.887 de 2003 descreve a ferramenta para a demarcação das terras quilombolas, qualquer obra no interior de uma região demarcada deve ser aprovada pela Fundação Cultural Palmares, aumentando o período de licenciamento	Binário [0,1]
Remoção de vegetação	I_{RV}	Quando da ocorrência de desmatamento, deve-se comunicar o IBAMA conforme descreve a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 que prevê o processo de Autorização de Supressão Vegetal (ASV) e captura, coleta e transporte de material biológico (ABIO)	Binário [0,1]
Talwegues	I_{Tal}	O estudo das bacias hidrográficas e dos talwegues é determinante para estimar o impacto ambiental do projeto, sendo assim, avalia-se o número de talwegues interceptados pela ferrovia.	$I_T = \frac{1}{NT}$
Áreas de Proteção Ambiental (APA)	I_{APA}	Essas áreas preveem o uso disciplinado de modo a assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais. Neste sentido, o Poder Público pode decretar limitações administrativas provisórias ao exercício de atividades de empreendimentos potencialmente causadores de degradação ambiental e as obras desenvolvidas nas unidades de conservação estão condicionadas a elaboração do Plano de Manejo.	Binário [0,1]
Área de Preservação Permanente (APP)	I_{APP}	Estas áreas são legalmente protegidas, ambientalmente frágeis e vulneráveis, podendo ser tanto públicas quanto privadas (Brasil, 2012), a interferência em tais áreas também aumenta o impacto ambiental do projeto.	Binário [0,1]

Quadro 6: Descrição dos indicadores de base de posição da seção de bloqueio (S.B.)

Indicador	Sigla	Descrição	Equação
Posição do AMV em relação a curva	I_{DA}	Define a distância (D_{AMV}) dos AMV em relação as curvas subsequentes. Assume-se a distância de 200 metros como sendo a mínima distância para a qual pode-se assumir dispersão do movimento pendular da composição a partir da saída da curva	$I_{DA} = D_{AMV}/200$
Raio da curva subsequente ao AMV	I_{RA}	Tendo em vista a complexidade de locação do AMV em zona próxima às curvas, o referido indicador expressa a facilidade com a qual pode-se corrigir a geometria da curva sem promover riscos operacionais. Assume-se 2000 metros, um raio de curva (R_{AMV}) para o qual não há ocorrência de riscos	$I_{RA} = R_{AMV}/2000$
Limite urbano	I_{PU}	Expressa o risco de perda operacional relacionada a expansão da cidade, caso o pátio seja implantado a menos de 1000 metros distância (D) desta. Acima de 1000 metros indicador é 1.	$I_{PU} = \left(\frac{D}{1000}\right)^{0,5}$
Centralidade	I_{CP}	A centralidade é dada pela equação a seguir em que $Cap_{SB\ ant}$ e $Cap_{SB\ pós}$ são as capacidades da seção de bloqueio resultantes antes e após o pátio proposto, ambos medidos segundo a metodologia de Colson	$I_{CP} = \left(1 - \frac{ Cap_{SB\ ant} - Cap_{SB\ pós} }{Cap_{SB\ ant} + Cap_{SB\ pós}}\right)$

3.5. Risco de desapropriação (I_{RD})

O referido macroindicador mede a possibilidade de ocorrência de desapropriação em função dos riscos decorrentes de alargamento de talude (I_{AT}), implantação de acessos (I_{IA}), solução de passagens em nível (I_{PN}) e implantação de AMV em curva (I_{FD-AMV}), conforme Quadro 7.

$$I_{RD} = I_{AT} * \text{Mín}(I_{PN}, I_{IA}) * I_{FDAMV} \quad (10)$$

3.6. Risco de desapropriação (I_{EFP})

Define a capacidade produtiva do pátio em quantidade de pares de trem (PdT) processados por dia em função da eliminação de interferências em nível (I_{IN}), da centralidade do pátio na seção de bloqueio (I_{CP}) e segundo a economicidade produtiva (I_{EP}) do pátio. Este último indicador corrige os ganhos de capacidade decorrentes de pátios muito extensos

$$I_{EFP} = (I_{CP} + I_{IN}) * I_{EP} \quad (11)$$

3.6.1. Economicidade produtiva (I_{EP})

Traduz o aumento de capacidade em função do tamanho do pátio proposto, estabelecendo a razão entre o comprimento necessário – medido segundo os níveis operacionais e o comprimento do trem-tipo do corredor estudado - e o comprimento pátio proposto possui efetivamente.

$$I_{EP} = l_{pátio \text{ (necessário)}} / l_{pátio \text{ (proposto)}} \quad (12)$$

3.6.2. Eliminação da interferência em nível (I_{IN})

Indicador binário que considera o benefício produtivo devido a eliminação de uma interferência em nível. Tendo em vista a possibilidade de eliminação de restrição e via e consequente aumento de capacidade, sua avaliação é dada de forma binária em que caso seja eliminada a interferência o indicador assume valor 1 e caso contrário, valor nulo.

Quadro 7: Descrição dos indicadores de base de risco de desapropriação

Indicador	Sigla	Descrição	Equação
Alargamento de talude	I_{AT}	Representa o risco de desapropriação para taludes cuja altura de corte (CV_C) ou aterro (CV_A) em módulo ultrapassa a largura da faixa e domínio (FD).	$I_{AT} = \left(1 - \frac{FD}{ \text{Máx}(CV_C; CV_A) }\right)$
Implantação de acesso	I_{IA}	Mede a risco devido a ocorrência de passagem em nível com possibilidade de criação de acesso segundo cota vermelha de corte e aterro ($CV_{C/A}$) e implantação de acesso de 8 metros de largura sem ultrapassar a FD	$R_{PN} = \left(\frac{FD - 8 - CV_{C/A}}{FD}\right)^{0,1}$
Passagem em nível	I_{PN}	Definida a impossibilidade de implantação de acesso, assume-se o indicador como nulo.	Binário [0,1]
Implantação de AMV em curva	I_{FDAMV}	Define o risco de ocorrência de desapropriação caso o AMV deva ser locado próximo a curva.	$I_{FDAMV} = \frac{FD - f_{AMV} - CV_{C/A} - 5}{FD}$

3. ANÁLISE MULTICRITÉRIO

No âmbito do presente estudo, a análise multicritério tem a função de ponderar os indicadores do estudo locacional. Para tanto, foi utilizada a matriz *Fuzzy-QFD*, conforme conceituada por Chen e Weng (2003), tendo sido adotados os macroindicadores como os elementos técnicos do pátio – design requirements (DR) – e os requisitos de percepção dos clientes do projeto – customers requirements (CR) – como sendo os itens do Quadro 3, definidos a partir de entrevista com especialistas. Na Figura 2 é apresentada a estrutura da matriz *Fuzzy-QFD*, segundo os conceitos citados e o papel da lógica *fuzzy* na matriz entre os elementos 1-4 e 4-5.

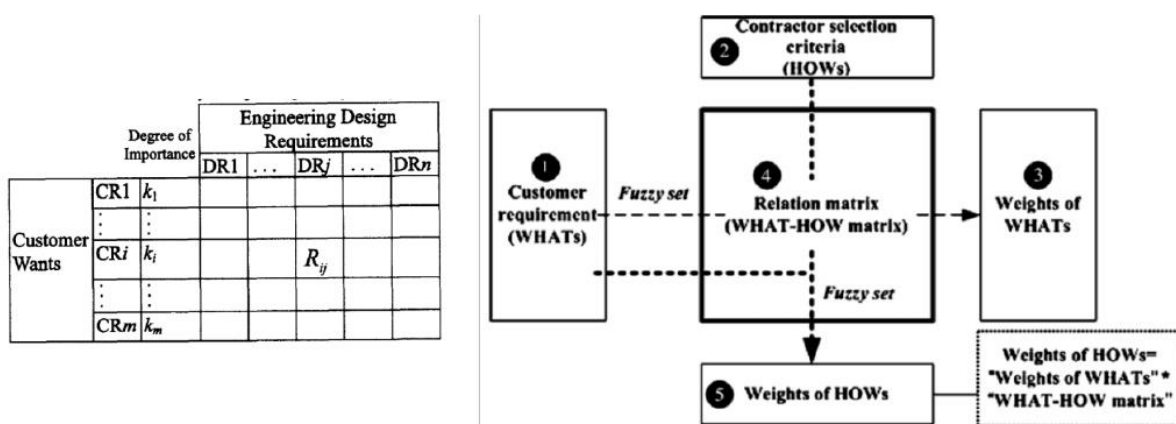


Figura 1: Estrutura *Fuzzy-QFD* (Chen e Weng, 2003 (esq.); Juan et al., 2009 (dir.)).

Ademais, foram correlacionados os cenários de análise – Quadro 2 – com os requisitos – Quadro 3 – e os requisitos com as características dos projetos – Quadro 1. Para tanto foram estruturadas três matrizes a partir de entrevistas com especialistas (DM1, DM2 e DM3), conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2. Em seguida, a partir das funções de pertinência apresentadas no Gráfico 3, são estruturadas as Tabelas 3 e 4. A relação entre os cenários e os CR é dada conforme sua importância em: absolutamente importante (AI); muito importante (MI); importante (I); pouco importante (P); e muito pouco importante (MP). A correlação entre os DR e CR é dada como: muito alta (MA); alta (A); média (M); baixa (B); muito baixa (MB).

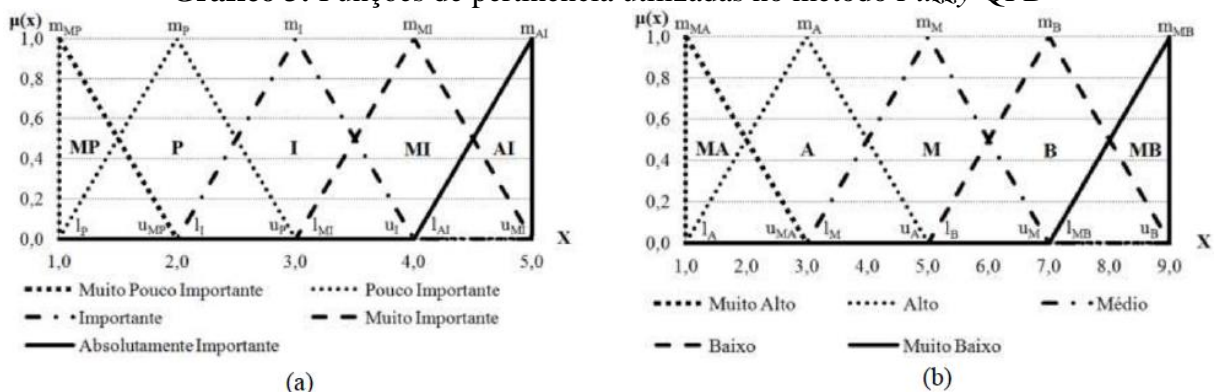
Tabela 1: Atributos de correlação entre os cenários e os requisitos dos clientes

Cenário 1 - Necessidade Imediata				Cenário 2 - Limitação Orçamentária				Cenário 3 - Maximização Capacidade			
	DM1	DM2	DM3		DM1	DM2	DM3		DM1	DM2	DM3
CR1	AI	AI	AI	C1	MP	MP	MP	C1	MP	MP	MP
CR2	MP	I	MP	C2	AI	AI	AI	C2	MP	P	P
CR3	MI	MI	I	C3	MP	MP	MP	C3	MP	MP	MP
CR4	MP	MP	MP	C4	P	MP	P	C4	AI	AI	AI
CR5	MP	MP	MP	C5	I	I	I	C5	I	MI	I

Tabela 2: Atributos de importância entre os requisitos dos clientes e os indicadores

		I_G	I_{CO}	I_A	I_{SB}	I_{RD}	I_{EFP}
DM1	C1	MB	MB	A	MB	MA	MB
	C2	MB	MA	MB	MB	M	MB
	C3	MB	MB	MA	MB	MB	MB
	C4	B	MB	MB	MA	MB	MA
	C5	MA	MB	MB	B	MB	M
DM2	C1	MB	MB	A	MB	MA	MB
	C2	MB	A	MB	MB	M	B
	C3	MB	B	MA	MB	MB	MB
	C4	B	MB	MB	MA	MB	MA
	C5	MA	MB	MB	B	MB	M
DM3	C1	MB	MB	A	MB	MA	MB
	C2	MB	A	MB	MB	M	B
	C3	MB	B	MA	MB	MB	B
	C4	B	MB	MB	MA	B	MA
	C5	MA	MB	MB	B	MB	MB

Gráfico 3: Funções de pertinência utilizadas no método *Fuzzy-QFD*



A ponderação das atribuições dadas pelos três especialistas (DM 1, 2 e 3) é dado pela média dos números triangulares, o que resulta na DMR conforme Tabela 3. Em seguida, a DMR é defuzzificada pelo método do centro de gravidade e normalizada para obtenção do peso (w). O mesmo procedimento é realizado para a correlação dos requisitos dos clientes e os indicadores conforme apresentado na Tabela 4, considerando a ponderação dos requisitos para cada cenário.

Tabela 3: Resultado da ponderação dos requisitos dos clientes segundo cada cenário

CENÁRIO 1 - NECESSIDADE IMEDIATA																		
	DM1			DM2			DM3			DMR			Pond	w				
C1	4,0	5,0	5,0	4,0	5,0	5,0	4,0	5,0	5,0	4,00	5,00	5,00	4,75	0,291				
C2	1,0	1,0	2,0	2,0	3,0	4,0	1,0	1,0	2,0	1,33	1,67	2,67	1,83	0,112				
C3	3,0	4,0	5,0	3,0	4,0	5,0	2,0	3,0	4,0	2,67	3,67	4,67	3,67	0,224				
C4	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,00	1,00	2,00	1,25	0,077				
C5	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,00	1,00	2,00	1,25	0,077				
CENÁRIO 2 - LIMITAÇÃO ORÇAMENTÁRIA																		
	DM1			DM2			DM3			DMR			Pond	w				
C1	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,00	1,00	2,00	1,25	0,077				
C2	4,0	5,0	5,0	4,0	5,0	5,0	4,0	5,0	5,0	4,00	5,00	5,00	4,75	0,291				
C3	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,00	1,00	2,00	1,25	0,077				
C4	1,0	2,0	3,0	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	3,0	1,00	1,67	2,67	1,75	0,107				
C5	2,0	3,0	4,0	2,0	3,0	4,0	2,0	3,0	4,0	2,00	3,00	4,00	3,00	0,184				
CENÁRIO 3 - MAXIMIZAÇÃO DA CAPACIDADE																		
	DM1			DM2			DM3			DMR			Pond	w				
C1	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,00	1,00	2,00	1,25	0,077				
C2	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	3,0	1,0	2,0	3,0	1,00	1,67	2,67	1,75	0,107				
C3	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,00	1,00	2,00	1,25	0,077				
C4	4,0	5,0	5,0	4,0	5,0	5,0	4,0	5,0	5,0	4,00	5,00	5,00	4,75	0,291				
C5	2,0	3,0	4,0	3,0	4,0	5,0	2,0	3,0	4,0	2,33	3,33	4,33	3,33	0,204				

Tabela 4: Resultado da ponderação das características técnicas

DM	R	I _G		I _{CO}		I _A		I _{SB}		I _{RD}		I _{EFP}							
		C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2						
C1	1,0	1,0	3,0	1,0	1,0	3,0	5,0	7,0	9,0	1,0	1,0	3,0	8,0	9,0	1,0	1,0	3,0		
C2	1,0	1,0	6,0	7,7	9,0	1,0	1,0	3,0	1,0	1,0	3,0	3,0	5,0	7,0	1,0	2,3	4,3		
C3	1,0	1,0	3,0	1,0	2,3	4,3	8,0	9,0	9,0	1,0	1,0	3,0	1,0	1,0	3,0	1,0	1,7	3,7	
C4	1,0	3,0	5,0	1,0	1,0	3,0	1,0	1,0	3,0	8,0	9,0	9,0	1,0	1,7	3,7	8,0	9,0	9,0	
C5	8,0	9,0	9,0	1,0	1,0	3,0	1,0	1,0	3,0	1,0	1,0	3,0	5,0	1,0	1,0	3,0	2,3	3,7	5,7
CENÁRIO 1 - NECESSIDADE IMEDIATA																			
POND	1,3	1,5	3,0	1,3	1,8	3,3	3,5	4,3	5,4	1,3	1,5	3,0	3,0	3,6	4,6	1,4	1,9	3,3	
Desfuzi.	1,841			2,078			4,398			1,841			3,710			2,129			
Peso (w)	0,115			0,130			0,275			0,115			0,232			0,133			
CENÁRIO 2 - LIMITAÇÃO ORÇAMENTÁRIA																			
POND	2,0	2,4	3,5	2,2	2,8	4,1	1,6	1,8	3,1	1,5	2,0	3,2	1,9	2,6	3,9	1,7	2,5	3,8	
Desfuzi.	2,594			2,948			2,078			2,154			2,728			2,636			
Peso (w)	0,171			0,195			0,137			0,142			0,180			0,174			
CENÁRIO 3 - MAXIMIZAÇÃO DA CAPACIDADE																			
POND	2,2	3,0	4,1	1,3	1,6	3,0	1,6	1,8	3,2	2,8	3,5	4,4	1,5	2,0	3,3	3,1	3,8	4,7	
Desfuzi.	3,048			1,861			2,108			3,547			2,208			3,863			
Peso (w)	0,183			0,116			0,132			0,222			0,138			0,241			

O resultado final da simulação do pátio é dado como sendo o máximo para cada cenário da Equação 13, em que $w_{i,j}$ é o peso do indicador resultante da análise multicritério

$$Rf_{c,p} = \text{Máx}_i(w_{Gi} * I_G + w_{COi} * I_{CO} + w_{Ai} * I_A + w_{BSi} * I_{SB} + w_{RD i} * I_{RD} + w_{EFPi} * I_{EFP}) \quad (13)$$

5. ESTUDO DE CASO

Por fim, foi desenvolvido um exemplo de aplicação em trecho ferroviário próximo a Catanduva-SP, conforme apresentado na Figura 1.

O resultado dos indicadores e as características dos melhores pátios estão apresentados nas Tabela 3 e 4. Na Tabela 3 encontram-se destacados os três pátios que apresentaram a melhor pontuação em cada cenário. Sem as ponderações dos cenários, o pátio com melhor resultado é o pátio 17

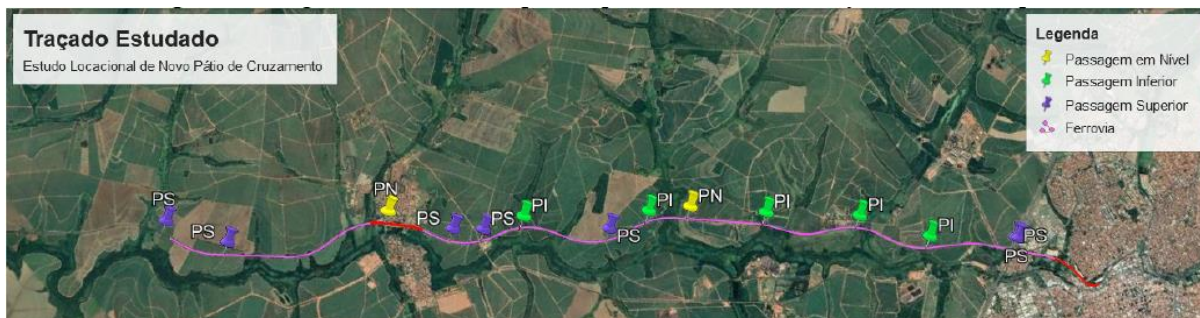


Figura 1: Imagem aérea do trecho para o qual foi simulada a criação de um novo pátio

Tabela 5: Resultado dos indicadores segundo cada cenário estudado

Pátios propostos	Início pátio	Final pátio	Extensão (m)	Geometria	Custo Obra	Impacto Ambiental	Posição S.B.	Risco Desaprop.	Capacidade Produtiva	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Pátio 1	44+897	47+556	2 659	0,914	0,456	0,625	0,738	0,750	0,704	0,689	0,693	0,740
Pátio 2	44+997	47+656	2 659	0,914	0,447	0,625	0,767	0,750	0,717	0,693	0,698	0,748
Pátio 3	45+397	48+776	3 379	0,906	0,288	0,625	0,621	0,546	0,639	0,597	0,594	0,649
Pátio 4	45+497	48+776	3 279	0,906	0,291	0,625	0,824	0,546	0,666	0,624	0,628	0,701
Pátio 5	45+597	48+776	3 179	0,906	0,294	0,625	0,840	0,546	0,693	0,630	0,636	0,712
Pátio 6	45+697	48+776	3 079	0,906	0,298	0,625	0,947	0,546	0,723	0,647	0,657	0,743
Pátio 7	45+797	48+776	2 979	0,906	0,303	0,875	0,950	0,546	0,754	0,721	0,698	0,785
Pátio 8	45+897	48+776	2 879	0,906	0,308	0,875	0,953	0,546	0,788	0,726	0,706	0,794
Pátio 9	45+997	48+776	2 779	0,906	0,315	0,875	0,955	0,546	0,823	0,732	0,713	0,804
Pátio 10	46+097	48+776	2 679	0,848	0,321	0,625	0,958	0,546	0,861	0,662	0,677	0,770
Pátio 11	46+197	48+856	2 659	0,848	0,327	0,625	0,962	0,589	0,880	0,676	0,690	0,782
Pátio 12	46+297	48+956	2 659	0,848	0,332	0,625	0,966	0,638	0,892	0,690	0,703	0,794
Pátio 13	46+397	49+042	2 645	0,848	0,334	0,625	0,970	0,638	0,910	0,693	0,707	0,799
Pátio 14	46+497	49+955	3 458	0,750	0,278	0,583	0,993	0,638	0,748	0,644	0,648	0,735
Pátio 15	46+597	49+955	3 358	0,750	0,312	0,583	0,995	1,000	0,776	0,737	0,725	0,796
Pátio 16	46+697	49+955	3 258	0,750	0,315	0,583	0,997	1,000	0,805	0,741	0,731	0,804
Pátio 17	46+780	49+955	3 175	0,750	0,318	0,583	0,999	1,000	0,831	0,745	0,737	0,811
Pátio 18	47+456	50+111	2 655	0,750	0,459	0,625	0,668	1,000	0,941	0,752	0,742	0,786
Pátio 19	47+556	51+131	3 575	0,750	0,181	0,625	0,703	1,000	0,635	0,679	0,640	0,688
Pátio 20	47+656	51+131	3 475	0,750	0,181	0,625	0,823	1,000	0,649	0,695	0,659	0,718
Pátio 21	47+756	51+131	3 375	0,750	0,182	0,875	0,821	1,000	0,663	0,765	0,696	0,754
Pátio 22	48+776	51+751	2 975	0,725	0,269	0,875	0,312	0,871	0,654	0,684	0,611	0,626
Pátio 23	48+876	51+751	2 875	0,725	0,266	1,000	0,484	0,871	0,672	0,740	0,655	0,685
Pátio 24	48+976	51+751	2 775	0,725	0,265	1,000	0,623	0,880	0,692	0,761	0,680	0,722
Pátio 25	49+042	51+751	2 709	0,725	0,264	0,750	0,621	0,880	0,706	0,694	0,648	0,692
Pátio 26	49+955	52+951	2 996	0,725	0,239	0,750	0,313	0,000	1,384	0,541	0,559	0,662

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO

No âmbito geral, os três pátios propostos a partir da ferramenta de auxílio a tomada de decisão apresentaram características satisfatórias de operação e execução. Destaca-se o desempenho da análise multicritério que ponderou adequadamente os resultados dos pátios, pois: atribuiu maior pontuação para o pátio 18 no cenário 2, que apresentou redução de 30% no custo do pátio e maximizou em 3 pares de trem (PdT) a capacidade no cenário 3 com o pátio 17. Todavia, no âmbito da agilidade de execução, o pátio 21 figura como a principal solução apesar do excesso de interferências deste projeto, o que é explicado pelo melhor impacto ambiental deste pátio. Neste sentido, em estudos futuros, deverão ser avaliadas possibilidades de ponderação ou novos indicadores que enfatizem melhor o impacto das interferências no prazo de execução.

Tendo em vista a simplicidade de cálculo utilizada para os indicadores e seus resultados, pode-

se afirmar que esses apresentaram um adequado desempenho. Todavia, deverão ser realizados testes de validação mais aprofundados das metodologias de cálculo utilizadas frente ao comportamento das variáveis na prática. Por fim, ressaltam-se os resultados obtidos a partir da metodologia *fuzzy*, que demonstrou maior capacidade de articulação das informações, destacando a possibilidade de seu uso em todo o modelo de decisão.

Tabela 6: Características dos pátios resultantes

Identificador	Agilidade de Execução	Custo de Implantação	Ganho Operacional
	Pátio 21	Pátio 18	Pátio 17
Posição do AMV inicial	47+756	47+456	46+780
Posição do AMV final	51+131	50+111	49+955
Comprimento S.B. anterior (m)	8 025	7 725	7 049
Comprimento S.B. posterior (m)	5 833	6 853	7 009
Comprimento do pátio proposto (m)	3 375	2 655	3 175
Custo estimado do pátio (R\$)	R\$ 18 900 668	R\$ 9 792 368	R\$ 13 018 123
Máx. Rampa exportação (%)	0,72%	0,72%	0,72%
Máx. Rampa importação (%)	0,56%	0,58%	0,65%
Capacidade S.B. anterior (PdT)	31,9	32,9	35,5
Capacidade S.B. posterior (PdT)	40,9	36,0	35,4
Distância AMV inicial – Curva (m)	200	20	203
Distância AMV final – Curva (m)	220	60	216
F.D. mínima – lado esquerdo (m)	15	20	20
F.D. mínima – lado direito (m)	15	20	20
Volume de corte (m³)	158 370	83 673	84 866
Volume de aterro (m³)	74 143	74 143	104 928
Quantidade de interferências	3 PS e 1 PI	1 PI e 1 PS	2 PI e 1 PS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGE, S. (2018) O transporte ferroviário e as ações voltadas para a proteção de fauna e flora. In: MEDEIROS NETO, E. M. de et al. Aspectos do direito ferroviário: Uma visão através do contencioso. São Paulo: Verbatim.
- ANTF (2019) Ferrovias de carga e o futuro do Brasil. Brasília.
- ANTT (2016) Caderno de estudos operacionais. Brasília.
- BRASIL. (2012) Código Florestal. Lei n. 12.651, de 25 de maio de 2012.
- Chen, L. H.; Weng, M. C. (2003) A *fuzzy* model for exploiting quality function deployment. In: Mathematical and Computer Modelling. Amsterdã. 38. p 550-570.
- Juan, Y.; Perng, Y. H.; Castro-Lacouture, D.; Lu, K. S. (2009) Housing refurbishment Contractors selection based on a hybrid *fuzzy*-QFD approach. Automation in Construction, v.18, p. 139-144.
- Langoni, R. A. R. (2006) Metodologia para análise operacional de pátios ferroviários de classificação. Monografia de especialização em Engenharia Ferroviária. Instituto Militar de Engenharia.
- LANGARI, R.; YEN, J. (1999) *Fuzzy Logic: Intelligence, Control and Information*. New Jersey: Prince Hall. 1ª ed. 548p.
- Mamdani, E. H. (1973) Applications of *fuzzy* algorithms for control of simple dynamic plant. In: Proceedings of the institution of electrical engineers. IET, v. 12, p.1585-1588.
- Paiva, C. E. (2016) Super e infraestrutura de ferrovias: critérios para projeto (1ª Ed.). Elsevier, Rio de Janeiro.
- Rosa, R. A. (2016) Operação ferroviária: planejamento, dimensionamento e acompanhamento. LTC, Rio de Janeiro.
- Johnson, L. W. (1990) Discrete Choice Analysis with Ordered Alternatives. In: Fischer, M.M.; P. Nijkamp e Y.Y. Papageorgiou (eds.) Spatial Choices and Processes. Amsterdam, Netherland.
- Zadeh, L. A. (1972) A *Fuzzy*-Set-Theoretic Interpretation of Linguistic Hedges, Journal of Cybernetics, 2:3, 4-34. Estados Unidos, Berkeley

Rafael L. Witiuk (rlwitiuk@gmail.com)
Fabiana B. von der Osten (Fabiana.osten@grupomarista.com)
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Rua Imaculada Conceição, 1166, Rebouças, Curitiba-PR, Brasil