

# Inteligência geográfica para avaliação de propostas de projeto de concessão de corredores ferroviários

Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega<sup>1</sup>, Rherman Radicchi Teixeira Vieira<sup>2</sup>, Cynthia de Freitas Queiroz Berberian<sup>3</sup>, Nivaldo Dias Filho<sup>4</sup>, Nilo Masukawa<sup>5</sup> e Eduardo Antônio Tavares Quadro<sup>6</sup>

**Resumo:** Projetos de infraestrutura de transportes demandam estudos de viabilidade como etapa antecessora as atividades de construção. As políticas públicas e os códigos ambientais que regem atualmente o processo de planejamento de transportes são mais abrangentes e complexos quando comparados ao praticado no passado. O processo atual requer a participação pública e a flexibilidade por parte dos atores envolvidos. Isso aumenta o volume de variáveis, de valores e de opiniões envolvidos no processo de tomada de decisão, demandando elevado grau de coordenação dos gestores. Soluções em geoprocessamento foram desenvolvidas para promover a coordenação, flexibilidade e a robustez necessárias no planejamento de transportes. A análise multicritério acoplada a um Sistema de Informações Geográficas (GIS) permite apoiar as decisões em transportes integrando elevada gama elevada de informações, procedimentos e regras de decisão de forma coordenada e organizada. O presente trabalho aborda uma metodologia desenvolvida para processar e ilustrar alternativas de corredores ferroviários que maximizem simultaneamente as viabilidades técnica, econômica e ambiental. A solução integra 35 variáveis organizadas em 5 cenários independentes (mercado, logístico, socioeconômico, físico e ambiental) utilizando ferramentas GIS básicas e avançadas, bem como o processo analítico hierárquico de tomada de decisão. Com o modelo foi possível desenvolver análises de sensibilidade em diferentes cenários, canalizando alternativas de corredores de viabilidade visando a redução do tempo e do custo nos trabalhos de campo. Contudo a solução resultou em métricas importantes como o controle, a eficiência, a transparência e a organização dos dados e dos processos.

*Palavras-chave:* sistema de informações geográficas, corredores de transporte, análise multicritério, participação pública, otimização, organização, transparência.

**Abstract:** Transportation infrastructure projects demand studies for feasibility prior to any engineering construction. Nowadays the public policies as well as the environmental codes that regulate the process are more complex compared to the past. The current process requires public participation and stakeholder flexibility, which demands an elevated degree of coordination from the transportation practitioners. As result, the volume of variables, values and opinions involved in the decision making process have increased. In order to offer coordination, flexibility and robustness GIS solutions have been developed to support the demand of transportation planning. A GIS model, coupled with a multicriteria decision making framework is a key important component to support a transportation planning process. It enables to compute large amount of variables therefore balancing different opinions in a coordinated framework. This work address a methodology developed to compute and plot alternative corridors regarding the economic, technical and environmental feasibility, all combined. The solution integrates up to 35 variables divided in 5 independent scenarios (market, logistic, socioeconomic, physic and environmental) using basic and advanced GIS tools and analytic hierarchy processes. The model allowed the team to perform sensitive analysis in different scenarios, therefore streamlining the best feasible alternative corridors aiming to reduce time and cost during the field work. It delivered key important metrics such as the efficiency, transparency and organization of the data processing flow.

*Keywords:* GIS, transportation corridor, multicriteria analysis, public participation, optimization, organization, transparency.

## 1. INTRODUÇÃO

Apreciada ou não por profissionais de transportes, a evolução das legislações que interferem direta ou indiretamente no planejamento de transportes é uma realidade.

Problemas atuais como impactos ambientais, ocupação desordenada e não planejada do uso do solo, deficiência logística, trânsito, poluição e segurança viária estão entre as lições aprendidas pela prática de um planejamento deficitário de transportes, e que hoje argumentam as políticas públicas e ambientais em transporte (Bruschi et al, 2015 ; Morelli et al, 2014). A complexificação das políticas de transporte (Stich et al, 2011 ; Tripp and Alley, 2004) e a necessidade de atender as legislações ambientais (Furney e Belcher, 2008) e a participação pública (Sadagopan, 2000) têm revelado diversos problemas, os quais hoje estão relacionados ao emprego de procedimentos ultrapassados para estudos de viabilidade. A necessidade de modernização do planejamento de transportes é um fato (US Department of Transportation, 2008) que se aplicado desde o momento da concepção da proposta de projeto, pode assegurar a viabilidade da proposta e maximizar o sucesso do empreendimento e (Berberian, 2016).

Projetos de infraestrutura de transporte, em especial os projetos de segmentos ferroviários como os anunciados no Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT) em

<sup>1</sup> Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega, Departamento de Engenharia de Transportes, UFMG. (raanobrega@ufmg.br)

<sup>2</sup> Rherman Radicchi Teixeira Vieira, Secretaria de Fiscalização de Infraestrutura Portuária, Hídrica e Ferroviária, TCU. (hermanrt@tcu.gov.br)

<sup>3</sup> Cynthia de Freitas Queiroz Berberian, Secretaria de Fiscalização de Infraestrutura Portuária, Hídrica e Ferroviária, TCU. (cynthiafq@tcu.gov.br)

<sup>4</sup> Nivaldo Dias Filho, Secretaria de Fiscalização de Infraestrutura de Petróleo, TCU. (nivaldodf@tcu.gov.br)

<sup>5</sup> Nilo Masukawa, Secretaria de Fiscalização de Infraestrutura Portuária, Hídrica e Ferroviária, TCU. (nilokm@tcu.gov.br)

<sup>6</sup> Eduardo Antônio Tavares Quadro, Secretaria de Fiscalização de Infraestrutura de Petróleo, TCU. (eduardo.quadros@valec.gov.br)

Manuscrito recebido em 22/02/2016 e aprovado para publicação em 29/12/2016.

Este artigo é parte de TRANSPORTES v. 24, n. 4, 2016. ISSN: 2237-1346 (online). DOI:10.14295/transportes.v24i4.1077

2012, atual Plano de Investimentos em Logística (PIL), bem como as atuais Concessões Ferroviárias anunciadas no PIL na forma de Procedimento de Manifestação de Interesse (PMI), disponíveis em <http://logisticabrasil.gov.br/ferrovias2>, requerem intensos estudos de viabilidade para assegurar o investimento e conhecer os custos, os benefícios e os riscos do projeto. O planejamento do projeto deve assegurar que os recursos da União sejam devidamente empregados, e que o projeto apresente viabilidade e sustentabilidade econômica, técnica, social e ambiental tanto da infraestrutura a ser construída quanto da região servida pela via.

Ocorre que a complexidade das decisões envolvidas no atual planejamento de transporte transcende a elevada, porém limitada, quantidade de variáveis envolvidas na perspectiva da engenharia, praticada há décadas. Para atender às exigências, normas e legislações vigentes, o planejamento de corredores de transporte, que por muito tempo teve como diretriz principal apenas as considerações de engenharia e de logística, hoje se vê na necessidade de abraçar um volume elevado de variáveis e considerações de caráter restritivo de modo a anteceder inconsistências técnicas e impactos negativos da obra. As legislações ambientais bem como o universo das políticas públicas a que um projeto dessa natureza é submetido são atualmente mais complexas e criteriosas que no passado. Desta forma, o desenvolvimento de projetos de infraestrutura de transporte, em especial corredores rodoviários e ferroviários, demanda estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental (EVTEA) antes de qualquer implementação de engenharia, a fim de que não sejam repetidos os erros do passado.

Mais do que nunca, a inclusão de informações ambientais, socioeconômicas e culturais em meio às informações tradicionais de engenharia como declividade do terreno e tipo de solo passa a ser de extrema importância. Todavia, essa inclusão eleva a gama de variáveis e de dados a serem analisados. Com isso, o problema passa a ser que os métodos tradicionais de estudo, repetidos há décadas, porém utilizando métodos de desenho assistidos por computador, são limitados quanto ao volume de informação para não inviabilizar a tomada de decisão humana. Neste contexto, o geoprocessamento é uma peça fundamental para auxiliar o processo de modernização do planejamento de transportes por possibilitar o desenvolvimento de modelos multicriteriais complexos que podem envolver um elevado número de variáveis e operações requeridas atualmente nos estudos.

Embora o Governo Federal tenha consciência da necessidade de modernização do planejamento de transportes, o Estado ainda não se encontra aparelhado por instrumentos e recursos humanos adequados a necessidade do processo. Para o presente momento, com a maturidade dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) como ferramentas de apoio no planejamento de transportes, bem como com o rigor da política ambiental, seria inadmissível que os gestores fechassem os olhos para as considerações apontadas na literatura. Isso daria margem à repetição de erros cometidos no passado sem que se busque por soluções modernas e integradas de como contorná-los.

Neste sentido, o presente trabalho tem como proposta apresentar e aplicar um modelo multicriterial de suporte a tomada de decisão desenvolvido em plataforma SIG, capaz de proporcionar análises de sensibilidade, cenários alterna-

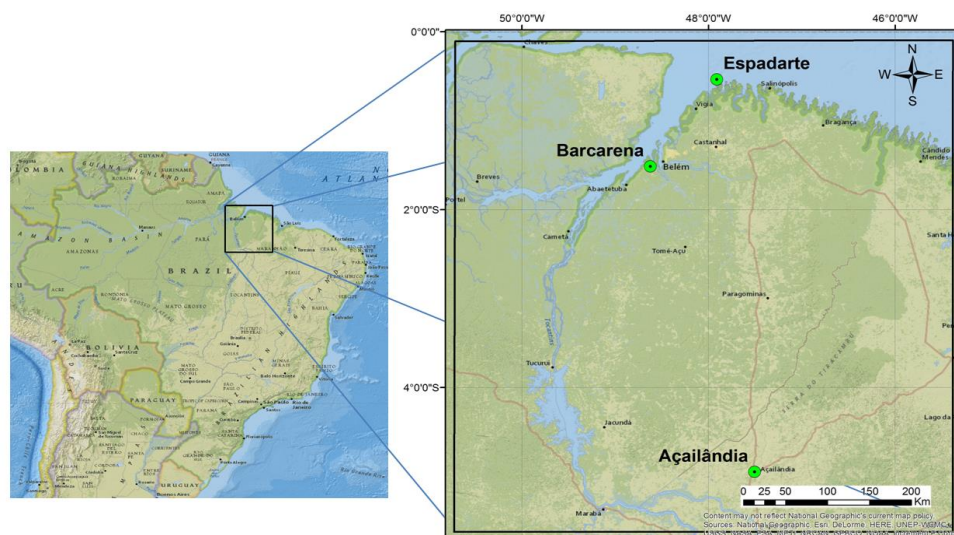
tivos e corredores de viabilidade com abrangência geográfica, complexidade de dados e regras e otimização do tempo de processamento. O objetivo é fornecer um ferramental que permita que as propostas de projetos de corredores ferroviários possam ser avaliadas em tempo hábil ainda em sua fase de concepção, permitindo uma avaliação preditiva da viabilidade da proposta antes que o Edital e o Termo de Referência do projeto sejam disponibilizados. O estudo foi desenvolvido ao longo do segmento norte proposto para Ferrovia Norte-Sul (FNS), interligando as localidades de Açailândia-MA e Barcarena-PA, trecho cuja licitação para EVTEA encontra-se ativa no Ministério dos Transportes.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Economia e transporte são pastas indissociáveis em qualquer gestão do governo (Nóbrega e Stich, 2012). Há décadas, autores como Gauthier (1970), Lewis (1991) e Fleming e Hayuth (1994) têm investigado a alta correlação existente entre o sistema de transportes, o uso e a ocupação do solo e o desenvolvimento econômico regional. O planejamento de transportes é peça fundamental para atender a demanda econômica regional (Gauthier 1970, Horner; O'Kelly 2001), porém exige profunda integração entre componentes ambientais, sociais, jurídicas e político-administrativas (Rodríguez *et al*, 2006; Rescia *et al*, 2005). As informações geradas pelos diferentes atores desse processo, quando espacializadas e integradas, passam a fornecer subsídios para tomadas de decisão.

As decisões tomadas em transportes são em geral complexas e não podem ser tratadas como disciplinas independentes, seja para estudos logísticos de origem e destino, acessibilidade ou questões ambientais. As intervenções físicas resultantes de um projeto viário geram reflexos no contexto geográfico. Da mesma forma, intervenções no espaço físico, ou simplesmente na legislação ou política que regem o território, têm reflexos no sistema de transportes (Nóbrega e Stich, 2012). Do ponto de vista ambiental, a densificação das malhas de transporte terrestre pode desencadear consequências negativas como a fragmentação de habitats naturais (Singleton e Lehmkuhl, 1999; Clevenger *et al* 2002; Furney e Belcher 2008; Nóbrega *et al* 2012), bem como problemas com a acessibilidade intra-urbana. Nos estudos de impacto ambiental em transportes, por exemplo, são considerados fatores que podem influenciar de modo positivo e negativo o contexto geográfico da área impactada por um projeto viário (Nóbrega e O'Hara, 2011).

A complexidade das variáveis no processo de planejamento de transportes e de uso do solo requer o emprego de modelos computacionais para apoiar a tomada de decisão (Saati, 1995). Com isso, há uma crescente demanda pela utilização de técnicas de geoprocessamento como chave para os sistemas de suporte a decisão espacial (Sadasiyuni *et al*, 2009). A demanda por informações espaciais estruturadas para apoiar a gestão e o planejamento de transportes foi uma das principais responsáveis pelos avanços conquistados pelos SIG (Butler, 2008). Ainda na década de 80, segundo Stich *et al* (2011), o *United States Census Bureau* desenvolveu o projeto TIGER (*Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing*), baseado em uma arquitetura simples porém organizada de dados vetoriais interdisciplinares e interoperáveis.



**Figura 1.** Localização da área de estudo e o respectivo polígono de abrangência das análises geográficas. Ilustração produzida pelos autores

Desde então, pesquisadores e profissionais de transporte nos Estados Unidos uniram esforços para criação de um grupo responsável pela investigação, especificação, e padronização de dados espaciais e métodos de processamento aplicados a transportes, denominado GIS-T (Butler, 2008). Atualmente o grupo é referência para especificações modelagem de dados geográficos para transportes e interoperabilidade entre órgãos gestores nas esferas federal e estadual.

Embora o planejamento e a gestão de transportes utilizem de geotecnologias, o processo ainda está aquém do efetivo uso da capacidade de modelagem e análise espacial existentes em plataformas de SIG. Contudo, a academia vem dialogando com governo e a iniciativa privada quanto ao emprego de ferramentas de análise geográfica em projetos de infraestruturas lineares de transporte, como em Souza et al (2014), ao investigar a associação entre os processos erosivos e as características topográficas e morfológicas do terreno ao longo da faixa de servidão de ferrovias. Vide também as iniciativas de aplicação de SIG no apoio à projetos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT 2013), cujo potencial poderia ser ampliado, incluindo iniciativas de estruturação de dados para compartilhamento corporativo e a participação de outras entidades do governo à fim de evitar a duplicação de dados e esforços. Há, contudo, iniciativas do emprego efetivo de SIG para computar alternativas de traçado e quantificar valores para a matriz de impactos ambientais confrontadas no EIA-RIMA, necessários para a tomada de decisão (Nóbrega *et al* 2012; Sadasivuni *et al*, 2009; Horner e O Kelly, 2001).

### 3. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

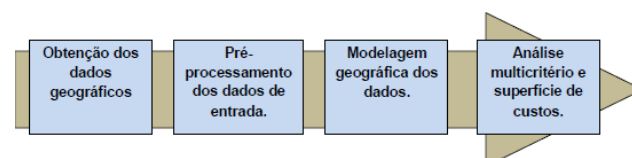
O estudo foi desenvolvido para a extensão norte da FNS, interligando as localidades de Açailândia-MA à Barcarena-PA, no entanto a área de estudo incluiu a região para a qual está sendo planejado o porto de Espadarte, no extremo norte do Estado do Pará. A região é caracterizada por terrenos de baixa declividade, com predominância de solos hídricos e vegetação variando entre densa cobertura florestal equatorial, áreas antropizadas com desmatamento, pastagem e campos agrícolas, e manguezais ao norte na costa. No contexto geral a economia da região tem como base atividades de prospecção mineral, em especial de bauxita, que

impõe grande influência quanto à atratividade do corredor ferroviário. Em menor escala atividades agropecuárias, comerciais e extrativistas. A região apresenta alta predominância de áreas de proteção ambiental e de reservas indígenas, as quais, de forma análoga as áreas de alta densidade hidrográfica bem como de solos saturados e colapsíveis, apresentam restrições ou alto custo de construção do segmento ferroviário.

De forma a maximizar a captura da diversidade socioeconômica, ambiental e as infraestruturas da região que possam influenciar o projeto da ferrovia, a área de estudo foi expandida 250 quilômetros para leste e oeste, respectivamente, contados a partir da diretriz entre Açailândia e Barcarena. O retângulo envolvente ou área de análise geográfica do modelo (Figura 1) está compreendida entre os paralelos  $00^{\circ} 06' S$  e  $05^{\circ} 40' S$  e entre as os meridianos  $45^{\circ} 22' W$  e  $50^{\circ} 44' W$ .

### 4. METODOLOGIA

O trabalho foi caracterizado em 4 etapas, iniciando pela obtenção e tratamento dos dados geográficos, o pré-processamento ou adequação dos dados para a entrada no modelo, a modelagem geográfica e a análise multicritério para a criação das superfícies de custo (ou esforço), conforme Figura 2.



**Figura 2.** Fluxo das etapas do modelo de inteligência geográfica para processamento de corredores de transportes.

#### 4.1. Recursos Computacionais

Uma das premissas para o desenvolvimento do estudo foi que o modelo resultante pudesse ser replicado, adaptado e aperfeiçoado em etapas futuras sem maiores dificuldades quanto a exclusividade dos recursos computacionais.

**Tabela 1.** Dados de entrada utilizados para a modelagem geográfica dos corredores de viabilidade do segmento ferroviário entre Açailândia-MA e Barcarena-PA.

Dados	Fontes	Tipo	Escala	Subconjunto
Localidades	INDE	Vetor-ponto	1:1.000.000	Socioeconômico
População	IBGE	Tabela		
PIB (agrícola, industrial, serviços e per capita)	IBGE	Tabela		
Hidrovias	BIT	Vetor-linha	1:1.000.000	Mercadológico e Logístico
Ferrovias	BIT	Vetor-linha	1:250.000	
Ferrovias Planejadas FEPASA	Governo do Estado do Pará	Texto		
Rodovias	BIT	Vetor-linha	1:250.000	
Dutos	BIT	Vetor-linha	1:250.000	
Linha de Transmissão	BIT	Vetor-linha	1:250.000	
Minério de Ferro	DNPM	Vetor-polígono	1:250.000	
Alumínio e Bauxita	DNPM	Vetor-polígono	1:250.000	
Calcário	DNPM	Vetor-polígono	1:250.000	
Jazidas e demais extrações minerais	DNPM – CPRM	Vetor-polígono	1:250.000	
Hidrografia	INDE	Vetor-linha	1:100.000	
Hidrografia Margem Dupla	INDE	Vetor-polígono	1:100.000	
Modelo de Elevação	SRTM refinado	Matriz	1:200.000	
Geomorfologia da Amazônia Legal	INDE	Vetor-polígono	1:1.000.000	
Uso do Solo	CSR – UFMG	Matriz	1:100.000	
Pedologia da Amazônia Legal	INDE	Vetor-polígono	1:1.000.000	
Solos	INDE	Vetor-polígono	1:1.000.000	
Terras Indígenas Demarcadas	INDE	Vetor-polígono	1:100.000	
Terras Indígenas em Estudo	INDE	Vetor-ponto	1:100.000	
RPPN e Áreas Protegidas	INDE	Vetor-polígono	1:100.000	
Mangues	INDE	Vetor-polígono	1:250.000	
Quilombos	INDE	Vetor-ponto	1:100.000	
Assentamentos	INDE	Vetor-polígono	1:100.000	
Brejos	INDE	Vetor-polígono	1:250.000	Restrição Ambiental
Cavernas	ICMBIO	Vetor-ponto	1:250.000	
Unidade de Conservação de Proteção Integral	INDE	Vetor-polígono	1:250.000	
Unidade de Conservação de Uso Sustentável	INDE	Vetor-polígono	1:250.000	

Para tanto, optou-se no emprego de aplicativos e equipamentos padrões de mercado, como estações de trabalho e programas SIG. Foram utilizados os seguintes recursos computacionais:

- ESRI ArcGIS 10.1, incluindo ferramentas avançadas do pacote Spatial Analyst para o processamento e análises dos dados;
- Microsoft Excel para edição, organização e análise dos dados tabulares;
- Google Earth para facilitar a interoperabilidade na visualização dos produtos entre os atores envolvidos;
- Computador com processador Athlon AMD-8, 3,6GHz e 32GB RAM para o desenvolvimento e cálculo do modelo.

#### 4.2. Dados de Entrada

O modelo integrou simultaneamente 35 variáveis distintas, como declividade do terreno, produto interno bruto agrícola e industrial, densidade viária e atratividade intermodal, hidrografia, áreas de proteção ambiental, entre outras. Todos, os dados de entrada, sem exceção, são oriundos de fontes públicas e foram adquiridos livres de quaisquer ônus. A Tabela 1 elenca os dados de entrada utilizados no modelo e suas respectivas fontes, bem como o tipo de dado e o subconjunto para o qual foi idealizado o emprego do dado no modelo.

#### 4.3. Pré-processamento

Na etapa de pré-processamento, os dados elencados na seção anterior foram preparados/modificados para servir como entrada no modelo. O primeiro passo foi o recorte geográfico dos dados utilizando o polígono da área de estudo, que apesar de extensa, reduz substancialmente o volume dos mesmos quando comparado ao dado inicial, em geral disponibilizado para todo o território nacional. Alguns dados passaram pelo processo contrário, sendo necessário um mosaico para compor a área de estudo, como foi o caso do modelo digital de elevação.

Uma vez em consonância com a área de estudo, os dados foram trabalhados para gerar mapas temáticos. As informações alfanuméricas dos dados tabulares foram devidamente conectadas a seus respectivos vetores utilizando identificadores como, por exemplo, os códigos de municípios. Esse procedimento permitiu a criação de informações gráficas, em formato vetorial, e que posteriormente foram cuidadosamente analisados e convertidos para o formato matricial (imagem). A principal característica desse processamento é a disponibilização de mapas temáticos.

#### 4.4. Modelagem Geográfica

A modelagem geográfica deste estudo foi adaptada do modelo proposto por Nobrega (2013) e Nobrega (2014). O procedimento compreende no tratamento da informação presente em cada mapa temático para que estes possam ser processados e analisados em conjunto.

**Tabela 2.** Exemplo da modelagem inicial para duas das variáveis utilizadas como entrada do modelo

Variável	Regra	Modelagem	Normalização
Produção agrícola (Soja)	Atração	Processamento de uma superfície por interpolação, utilizando o centro de massa do município e o atributo de produção agrícola (soja). A superfície resultante é dividida em 9 classes conforme a produção. A atribuição dos fatores AHP é inversamente proporcional ao valor da produção. Quanto maior a produção, menor o fator AHP e, respectivamente, maior a atratividade da área para o corredor. Quanto menor a produção, maior o fator AHP e maior o esforço operacional para corredor.	Mapa temático dividido em 9 classes (ton de grãos): A atribuição dos fatores AHP será inversamente proporcional à produção.
Terras indígenas demarcadas ou homologadas	Repulsão	O polígono da área indígena é tratado como máscara restritiva. É criado uma zona de amortecimento de 10Km no entorno do polígono. O entorno do polígono é recortado a fim de evitar seu uso no projeto. É atribuído o fator AHP = 9 para a área de amortecimento. A regra impede a ocupação da área indígena, e dificulta a ocupação da área no entorno da terra indígena.	Máscara restritiva no polígono da área indígena. Zona de amortecimento de 10 km com fator AHP=9 para área de amortecimento

Contudo, o desafio inicial da modelagem é o entendimento geral do problema e como cada mapa temático de entrada deverá ser tratado para que o problema passa ser solucionado. Neste sentido, os passos necessários foram: [1] estabelecimento de regras para modelar cada mapa temático e [2] normalização dos valores. Explicações técnicas sobre os procedimentos da modelagem geográfica podem ser encontrados em Sadasivuni et al (2009), bem como a caracterização prática para compreensão por parte de stakeholders e gestores de transportes em Nóbrega et al (2009).

Em síntese, para o estabelecimento das regras, cada mapa temático foi analisada e tratada como variável de entrada do modelo. Cada variável foi modelada de forma exclusiva, em um processo que objetiva a produção de mapas temáticos derivados, permitindo que mapas temáticos que contenham dados qualitativos (nominais, categóricos) e dados quantitativos (intervalares, ordinais) puderam ser descritos sob uma mesma escala numérica e adimensional de grandeza para que possam ser posteriormente processados em conjunto. A Tabela 2 exemplifica e a Figura 3 ilustra o processo.

**4.5. Análise Multicriterial**

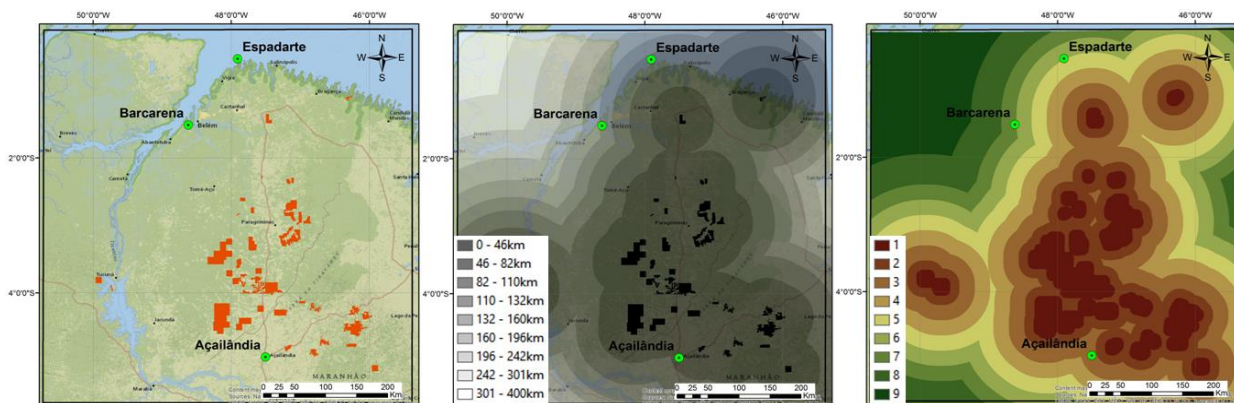
As variáveis, caracterizadas por propriedades espaciais, foram classificadas em 5 perspectivas (ou grupos distintos de variáveis), concorrentes entre si, os quais consideram as perspectivas mercadológica, logística, socioeconômica,

física e ambiental. Para tal classificação, foram selecionadas variáveis que atendessem ao propósito de diferentes temas sob os quais as decisões são tomadas. A classificação das variáveis em diferentes tipos visa garantir que especialistas de diferentes áreas não interfiram diretamente nas ponderações e regras de análises de variáveis fora de sua competência técnica. Assim, o modelo foi concebido para que possa ser abastecido por ponderações de especialistas de diferentes áreas minimizando viés e a interpretação errônea de técnicos de diferentes áreas.

As variáveis foram trabalhadas em um processo hierárquico de análise multicriterial, conforme ilustra a Figura 4. Para cada perspectiva foram adotadas estratégias de pesos entre as variáveis. A adoção dos pesos foi indireta e considerou inputs no intervalo entre 1 e 9, correspondentes ao modelo AHP (Saaty, 1995). A estratégia considerou sempre o grau de esforço ou custo potencial oferecido para a implantação da ferrovia para cada variável. Valores menores representaram no modelo atração (maior viabilidade) e valores maiores representaram repulsão (baixa viabilidade ou impossibilidade).

Como resultado, o modelo gera mapas temáticos combinados, que integram as superfícies de esforço (Figura 6) sob as quais são computadas as regiões de viabilidade para interligação das localidades de interesse.

O processo permite a substancial redução do tempo de análise, ilustra sob a forma de mapas, gráficos e tabelas, aponta as áreas de maior viabilidade (diretriz natural esperada para a implantação da infraestrutura) e quantifica as áreas não viáveis para a implantação da obra.



**Figura 3.** Exemplo de modelagem geográfica utilizada no estudo do segmento ferroviário entre Açailândia-MA e Barcarena-PA. À esquerda as minerações de bauxita, ao centro as distâncias euclidianas computadas das minerações, representadas em 9 classes computadas por intervalo geométrico de histograma, e à direita as respectivas ponderações para análise pareada AHP

Nível 1	SOCIOECONÔMICO		MERCADOLÓGICO		LOGÍSTICO		AMBIENTAL		FÍSICO	
	critério	ranking	critério	ranking	critério	ranking	critério	ranking	critério	ranking
	POPULAÇÃO	6	SOJA	3	RODOVIAS - DENSIDADE	3	TERRAS INDÍGENAS OFICIAIS	9	HIDROGRAFIA - DENSIDADE	5
	PIB AGROPECUÁRIO	3	OUTROS GRÃOS	4	HIDROVIA	8	TERRAS INDÍGENAS ESTUDO	7	HIDROGRAFIA - DISTÂNCIA	5
	PIB INDUSTRIAL	1	MINÉRIO DE FERRO	2	JAZIDAS	2	UC - PROTEÇÃO INTEGRAL	7	DECLIVIDADE	9
	PIB SERVIÇOS	5	CALCÁRIO/FOSFATO/CAULIM	3	FERROVIA FEPASA	1	UC - USO SUSTENTÁVEL	5	GEOMORFOLOGIA	3
	PIB PER CAPTA	6	BAUXITA	1			CAVERNA	9	SOLOS MOLES	9
			OUTROS MINÉRIOS	4			QUILOMBO	7	LINHA DE TRANSMISSÃO	5
							ASSENTAMENTO	7	DUTO	5
							MANGUE	5		
							FLORESTA NATIVA (MACIÇO)	5		
							SÍTIO ARQUEOLÓGICO	9		
							RPPN	9		

Figura 4. Perspectivas, variáveis e seus respectivos rankings utilizados no nível 1 do processo multicriterial implementado para o estudo do TCU do trecho norte da Ferrovia Norte-Sul

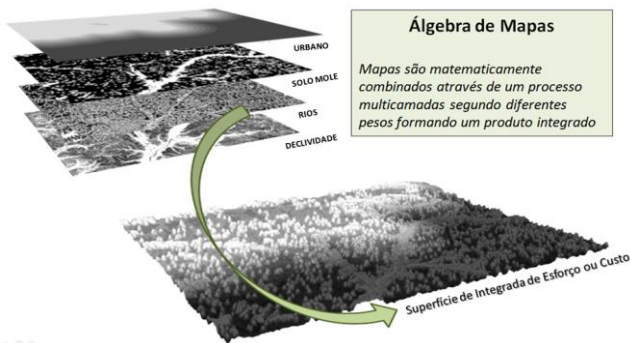


Figura 5. Processo de integração dos mapas temáticos para composição da superfície de esforço, procedimento similar ao adotado ao integrar as variáveis de cada cenário no nível 1 e ao integrar os cenários no nível 2. Adaptado de Sadasivuni (2009)

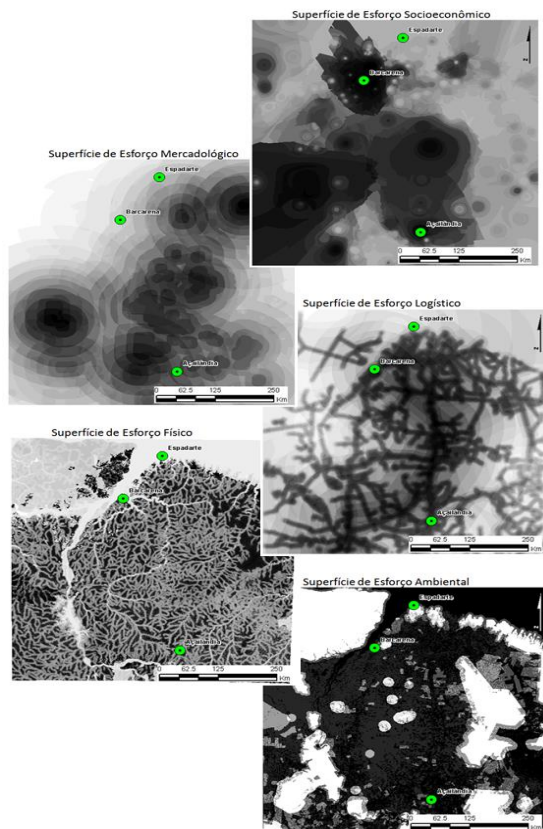


Figura 6. Superfícies de esforço resultantes das 5 perspectivas do modelo. Áreas escuras nas superfícies correspondem a regiões de maior viabilidade para instalação do corredor.

## 5. RESULTADOS E ANÁLISES

Uma vez estabelecidas as cinco superfícies de esforço resultantes das perspectivas independentes, estas foram integradas no segundo nível do processo hierárquico. Foram estabelecidos três cenários integrados, os quais correspondem a análises de sensibilidade da solução para modelar os respectivos corredores de viabilidade. De forma análoga ao nível 1, o processamento do nível hierárquico 2 gerou três novas superfícies de esforço integradas (Figura 7), utilizadas nos respectivos cálculos dos corredores (Figuras 8 e 9).

Embora distintos, os resultados dos três cenários integrados analisados mostraram convergência entre os corredores resultantes. Em todos os casos as áreas apontadas como sendo as de maior viabilidade para a instalação da infraestrutura ferroviária sofreram desvios causados pela repulsão de áreas com restrições ambientais. Em seus trechos inferiores, os corredores mostraram grande aderência pela atração logística, socioeconômica e mercadológica para conectar em uma linha quase direta as localidades de Açailândia-MA e Paragominas-PA. A escolha foi também apoiada na maximização da geologia e geomorfologia adequadas, reduzindo o número de travessias de rios e de intersecção de áreas de alto potencial para solos moles.

Ainda que o propósito inicial do trabalho estabelecido pela equipe tenha sido o emprego de um modelo de inteligência geográfica para calcular e representar alternativas de corredores para a ferrovia Norte-Sul entre Açailândia-MA e Barcarena-PA, houve também a preocupação em incluir no modelo o Porto de Espadarte, cujo apelo principal para sua construção é a capacidade operacional devido a profundidade de calado. Esta configura um atrativo especial, pois o Porto de Espadarte seria construído em águas profundas, compatível com a nova demanda de tráfego esperada após a ampliação do Canal do Panamá, bem como a capacidade operacional da ferrovia Norte-Sul. A Figura 8 ilustra os resultados do modelo incluindo o Porto de Espadarte.

De forma análoga aos resultados ilustrados na Figura 7, a convergência dos três resultados na metade inferior pode ser explicada pela atração das variáveis logísticas, mercadológicas, socioeconômicas e físicas.

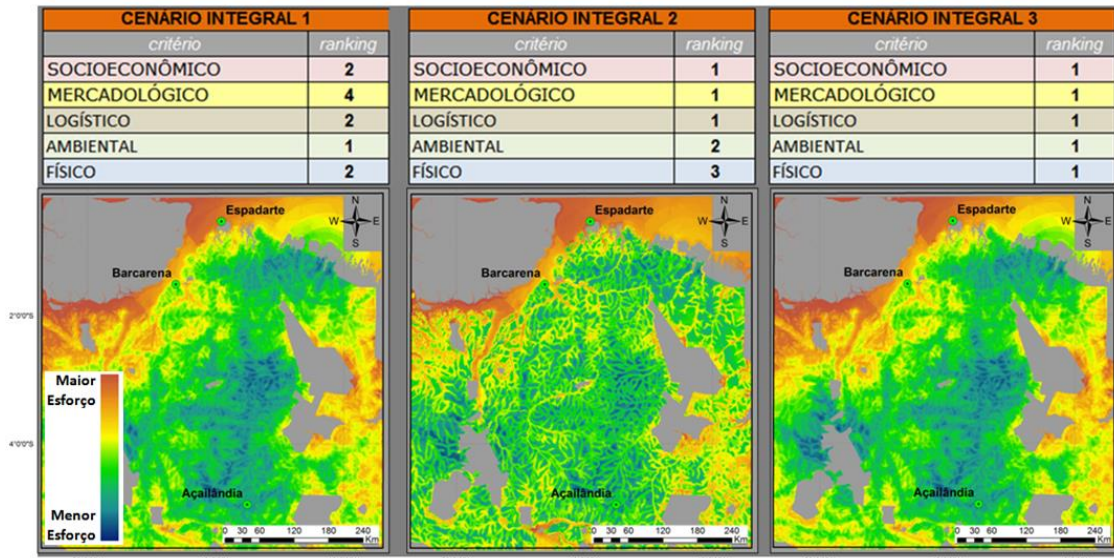


Figura 7. Análise de sensibilidade proposta a partir das superfícies de esforço resultantes dos 5 cenários estabelecidos no modelo

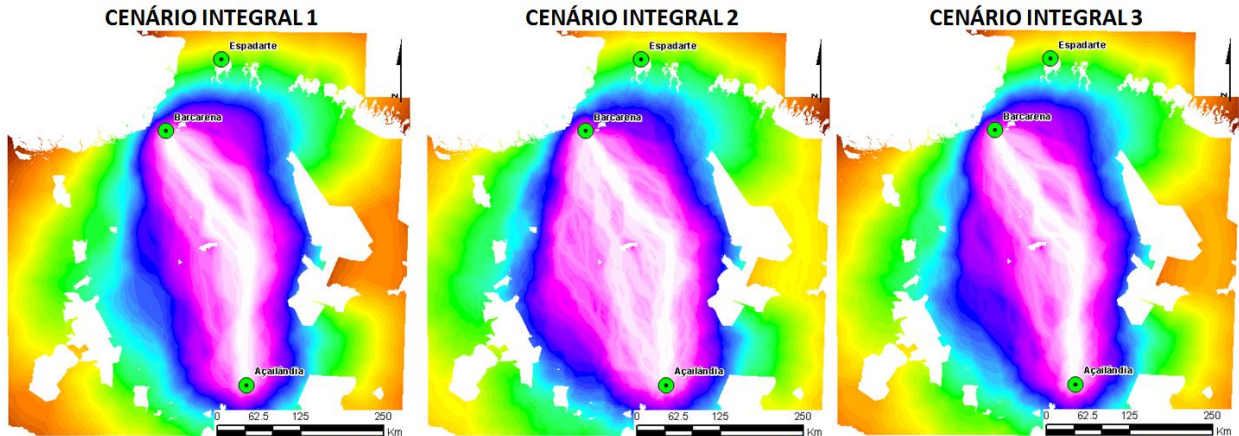


Figura 8. Corredores de viabilidade interligando Açailândia-MA e Barcarena-PA. Áreas

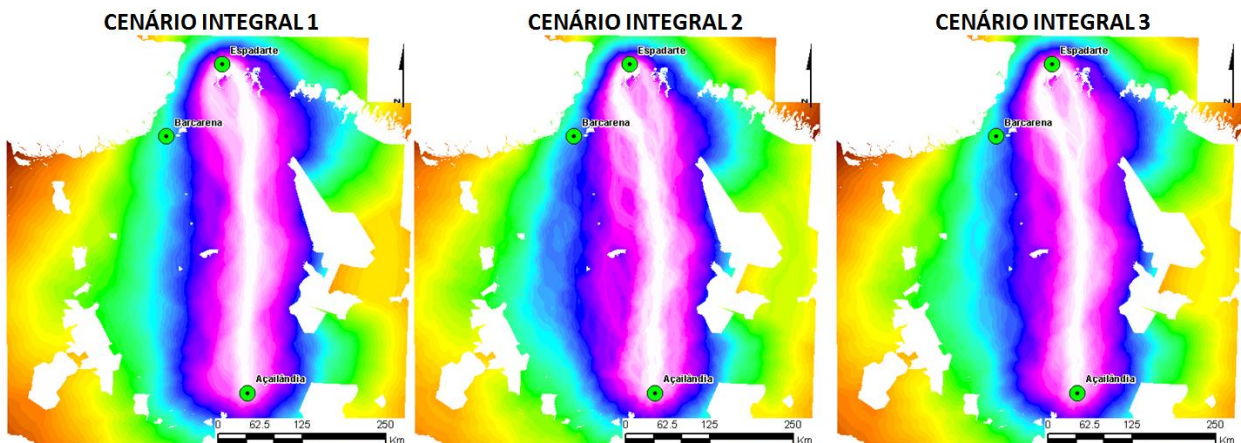


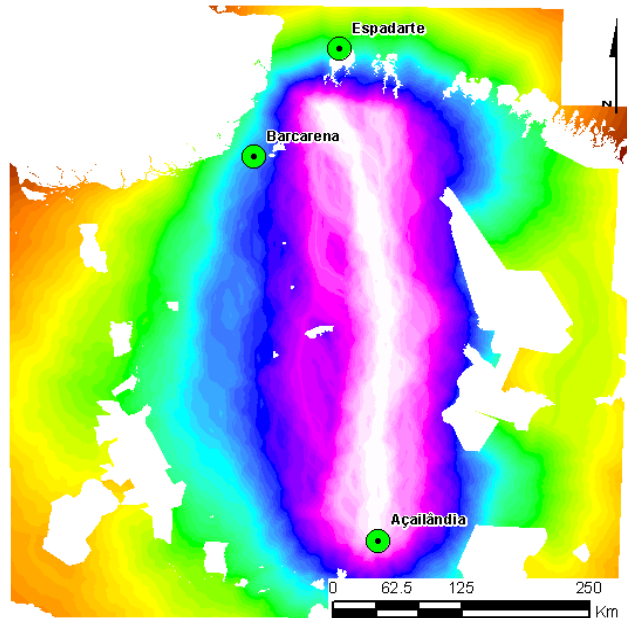
Figura 9. Corredores de viabilidade interligando Açailândia-MA e Porto Espadarte-PA. Áreas brancas e rosadas representam maior viabilidade para implantação da ferrovia

No geral, o comportamento dos três corredores foi muito similar, salvo a proximidade sul do Porto de Espadarte para a qual o modelo apresentou duas opções de corredor na tentativa de minimizar os impactos ambientais ao interceptar áreas de mangue e solo saturado.

É importante ressaltar que o tempo total empregado no processo, desde a fase de obtenção dos dados, análises preliminares, pré-processamentos e análises multicriteriais foi inferior a 30 dias, prazo obrigatório em que a proposta de projeto circula entre órgãos competentes do Governo para que o edital possa ser analisado e aprovado. As etapas

que mais demandaram tempo foram a análise e preparação dos dados de entrada, as quais juntas tomaram cerca de 10 dias por se tratarem de operações manuais. Uma vez inseridas no modelo, os protocolos semi-automatizados permitiram que as etapas seguintes pudessem ser desenvolvidas em poucas dezenas de horas de processamento. Todo o procedimento foi desenvolvido utilizando o aplicativo SIG (ESRI arcGIS) e microcomputador (processador Athlon AMD-8, 32GB RAM) padrões de mercado, visando a facilidade para de replicar o uso do modelo.

Utilizando os resultados dos corredores entre Açailândia-MA e Barcarena-PA, e entre Açailândia-MA e Porto Espadarte-PA, foi também possível combinar os resultados para obter um mapa de viabilidade integrado (Figura 10), metodologia esta que pode apoiar investigações sobre a efetividade da escolha de localidades-chave para instalação de licitações de projetos.



**Figura 10.** Corredor ilustrando as áreas de maior viabilidade entre diferentes soluções

Embora em caráter preliminar, e adicional ao objetivo proposto neste estudo, o cenário produzido pela análise de sensibilidade comparativa entre os portos de Espadarte e Barcarena mostrou maior aderência do corredor ao Porto de Espadarte. Análises dessa natureza poderiam ser desenvolvidas para indicar possíveis deficiências no projeto em licitação, e possibilitar que o problema seja sanado antes do início e implementação da obra.

## 6. DISCUSSÃO

A utilização de técnicas de caminho de menor custo (ou *Least-Cost Path Analysis*), há tempos empregada como solução de geoprocessamento para otimização de planejamento de transportes (Douglas, 1994 ; Pinto e Keitt, 2009), não reflete como uma solução eficaz para atender as exigências da complexas políticas pública e ambientais no contexto do planejamento de transportes (He et al, 2016). Ainda que exista uma parcela significativa em prol da modernização do planejamento de transportes, o geoprocessamento por si não proporciona a integração das políticas envolvidas no processo, mas sim a integração dos dados. Entretanto, ao modelar geograficamente uma solução pautada em análises multicriteriais é possível não só atingir a integração dos dados, mas também dos atores e de suas respectivas interpretações sobre os dados Stich et al, 2011.

A busca por uma solução robusta e eficiente para atender a demanda contemporânea e futura do planejamento de transportes é uma realidade no exterior (U.S. Department of Transportation, 2008 ; O'Hara et al, 2010 ; He et al, 2016, Sharifi et al, 2006) e no Brasil (Sampaio et al, 2015, Nobrega, 2013, 2014).

A proposta deste trabalho está fundamentada na necessidade do Governo em deter conhecimentos em análises geográficas e utilizar uma metodologia capaz de promover simultaneamente a otimização do tempo empregado em suas ações investigativas, a redução dos custos operacionais e a maximização da qualidade do trabalho (U.S. GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE, 2011). No Brasil, cabe ao Tribunal de Contas da União (TCU) a responsabilidade de analisar criticamente os projetos, entre outros, de infraestrutura de transportes como, por exemplo, trechos de concessão rodoviária e projetos de segmentos ferroviários em vias de projeto, em estudo e previstos (Berberian, 2016). Projetos de concessão encontram a obrigatoriedade de serem qualificados pelo TCU antes da publicação do Edital Público. Ocorre que o intervalo de tempo dado ao Tribunal para desenvolver as análises é exíguo devido à complexidade dos estudos, demandando o desenvolvimento de ferramentas de tecnologia que permitam realizar uma análise robusta e ágil. O desenvolvimento do modelo utilizado neste estudo foi apoiado na hipótese de que a modelagem geográfica de dados, valores e processos de decisão permitiria ganhos em qualidade e tempo. Neste sentido, a solução trata da modelagem de corredores de viabilidade através de superfícies de custo, estas obtidas em função de ponderações advindas de análises multicriteriais intravariável (modelagem interna das variáveis), intervariáveis (ponderação entre variáveis de um mesmo grupo) e ponderações entre os grupos de variáveis (análises de sensibilidade). O modelo, construído e posto a prova demonstrou resultados positivos, sendo a motivação maior o fato de que o mesmo empregou de dados públicos, transparência nas regras e possibilidade de ser reproduzido.

O resultado do corredor de ligação entre os dois pontos foi consistente com o esperado. Como ainda não existe um projeto de traçado para esta via ferroviária, os resultados desta análise multicritério poderão ser usados no futuro para avaliar as propostas de traçado a serem apresentadas pela ANTT. Acredita-se que no momento da avaliação do projeto, o modelo também poderá oferecer informações de valor – com a visualização de vários cenários diferentes – para a escolha do local do porto.

## 7. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi desenvolvido um modelo de inteligência geográfica voltado à maximização da abrangência geográfica e contextual para processamento e desenho de corredores de viabilidade para projetos de ferrovias, levando em consideração a otimização do tempo de análise. Os resultados foram muito positivos. O modelo revelou-se simples e flexível, pois possibilita que as regras sejam moldadas de forma dinâmica, incluindo a participação de atores e suas respectivas opiniões ponderadas em pesos para a criação de cenários. Os resultados gráficos permitem uma fácil visualização comparativa das alternativas e dos corredores que melhor atendem os critérios estabelecidos. Ademais, o modelo traz transparência quanto aos dados utilizados, bem como valores e regras adotados. Todas as informações (quantitativas e qualitativas) são devidamente registradas no sistema em forma de mapas e tabelas, possibilitando a reprodução do estudo.



O trabalho piloto de análise multicritério espacial mostrou grande potencial de aplicação em controle externo. A ferramenta expande a forma em que a análise é feita atualmente, quando se consideram somente as variáveis geográficas. A ferramenta permite que se avaliem as escolhas de políticas públicas como um todo, pois expande a quantidade e o tipo de variáveis consideradas e permite resumir, em um resultado gráfico, variáveis não quantificáveis ou que não podem ser monetizadas. Esta ferramenta permite a avaliação do traçado ótimo para obras lineares (rodovias, ferrovias, canais, linhas de transmissão, etc). Com tanto potencial, existe a possibilidade de aplicação direta nas áreas de fiscalização de obras, educação, ambiental, saúde, entre outras. Além disso, existem diversas customizações que poderão ser desenvolvidas, merecendo destaque a possibilidade de se monetizarem as variáveis e mapas temáticos, para gerar superfícies financeiras a serem comparadas.

A capacidade operacional do modelo em processar áreas extensas com profundo detalhamento contextual das análises, bem como a otimização do tempo e da capacidade analítica dos atores envolvidos no modelo contribuem de forma positiva para a modernização do processo de planejamento de transportes. Acredita-se que, de posse do modelo e de seu conhecimento operacional, as ações de fiscalização e controle externo do Governo Federal poderão ser desenvolvidas com maior agilidade e acurácia.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Secretaria de Fiscalização de Infraestrutura Portuária, Hídrica e Ferroviária do Tribunal de Contas da União - TCU e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo incentivo a pesquisa e apoio técnico.

## REFERÊNCIAS

- Berberian, C. F. Q. ; Vieira, R. R. T. ; Dias Filho, N. ; Ferraz, C. A. M. ; Nobrega, R. A. A. (2015). O uso de geotecnologias como uma nova ferramenta para o controle externo. *Revista do Tribunal de Contas da União*, v. 133, PP 40-53.
- Bruschi, D., Garcia, D. A., Gugliermetti, F.; Cumo, F. (2015). Characterizing the fragmentation level of Italian's national Parks due to transportation infrastructures. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 36, pp. 18-28. DOI: 10.1016/j.trd.2015.02.006
- Butler, J. A. (2008). *Designing geodatabases for transportation*. Esri Press, 1st Ed., ESRI Press, New York, 459p. ISBN-10: 158948164X
- Clevenger, A. P., Wierzchowski, J., Chuszc, B.; Gunson, K. (2002). GIS-generated, expert-based models for identifying wildlife habitat linkages and planning mitigation packages. *Conservation Biology*, Volume 16, pp. 503-14. DOI: 10.1046/j.1523-1739.2002.00328.x
- DNIT Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2013). Programa de Planejamento Geotecnologias Aplicadas. Disponível em : <http://www.dnit.gov.br/planejamento-e-pesquisa/planejamento/Geotecnologias-aplicadas> Acesso em 27/04/2013.
- Douglas, D.H. (1994). Least-cost path in GIS using an accumulated cost surface and slopelines. *Cartographica*, 31, 37–51. DOI: 10.3138/D327-0323-2JUT-016M
- Fleming, D. K.; Y. Hayuth. (1994). Spatial characteristics of transportation hubs: Centrality and intermediacy. *Journal of Geography*, n. 2, v. 1, p. 3-18. DOI: 10.1016/0966-6923(94)90030-2
- Furney, C.; A. Belcher. (2008). Using GIS tools to develop preliminary highway corridors. *Proceedings of 2008 ESRI International User Conference, San Diego, 2008*. Disponível em: [http://gis.esri.com/library/userconf/serug08/papers/user/transportation/utilizing\\_gis\\_tools\\_to\\_develop\\_preliminary\\_highway\\_corridors.pdf](http://gis.esri.com/library/userconf/serug08/papers/user/transportation/utilizing_gis_tools_to_develop_preliminary_highway_corridors.pdf) Acesso em 12 de Dezembro de 2010.
- Gauthier, H. L. (1970). Geography, transportation and regional development. *Economic Geography*, n. 46, v. 4, p. 612–619. DOI: 10.2307/142944
- He, G.; Mol, A. P. J.; Lu, Y. (2016). Public protests against the Beijing-Shenyang high-speed railway in China. *Transportation Research Part D*, v.43, p. 1-16. DOI: 10.1016/j.trd.2015.11.009
- Horner, M. W.; M. E. O’Kelly. (2001). Embedding economies of scale concepts for hub network design. *Journal of Transportation Geography*, n. 9, v. 4, p. 255–265. DOI: 10.1016/S0966-6923(01)00019-9
- Lewis, D. (1991). *Primer on transportation, productivity and economic development*. Report of National Cooperative Highway Research Program Rep. 342, Transportation Research Board, Washington, DC. ISBN: 0-309-04865-6
- Morelli, F. Beim, M.; Jerzak, L.; Jones, D.; Tryjanowski, P. (2014). Can roads, railways and related structures have positive effects on birds?. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 30, pp. 21-31. DOI: 10.1016/j.trd.2014.05.006
- Nobrega, R. A. A (2014). *Desenvolvimento de arquitetura multicritérios de geoprocessamento para otimização do estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental na definição do corredor ferroviário entre Chapecó-SC e Rio Grande-RS*. Relatório Final, STE Serviços Técnicos de Engenharia. Brasília, DF.
- Nobrega, R. A. A. (2013). *Elaboração e execução de uma arquitetura multicritérios para otimização do estudo para a definição do corredor ferroviário entre Panorama-SP e Chapecó-SC*. Relatório Final, Contécnica Consultoria Técnica. Belo Horizonte, MG.
- Nobrega, R. A. A.; C. G. O’Hara; R. Sadasivuni; Stich, B. (2012). Assessing environmental-impacted features of EIA study in corridor planning based on GIS and remote sensing technologies. *Proceeding of IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação*. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE.
- Nóbrega, R. A. A.; Stich, B. (2012). Towards the Long Term Recovery in Mississippi: Understanding the Impact of Transportation System for Economic Resilience. *Journal of Leadership and Management.*, v.12, p.21-35. DOI: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000184
- Nobrega, R. A. A.; O’Hara, C. G. (2011). Evaluating the Design of the Streamlined GIS-based Transportation Corridors. In: *Transportation Research Board 90th Annual Meeting, 2011*, Washington DC.

- <http://www.trb.org/AnnualMeeting2011/AnnualMeeting2011.aspx>, 2011
- Nobrega, R. A. A.; O'Hara, C. G.; Sadasiwuni, Dumas, J. (2009). Bridging decision-making process and environmental needs in corridor planning. *Management of Environmental Quality International Journal*, v. 20, p. 622-637. DOI: 10.1108/14777830910990744
- O'Hara, C. G. ; Nobrega, R. A. A. ; Stich, B. ; Holland, J. (2010). Technical Guidelines, prepared by the National Consortium for Remote Sensing in Transportation Streamlining Environmental and Planning Process (NCRST-SEPP) for the United States Department of Transportation (USDOT). In: *TRB Environmental and Energy Conference*, 2010, Raleigh, NC.
- Pinto, N.; Keitt, T. H. (2009). Beyond the least-cost path: evaluation corridor redundancy using a graph-theoretic approach. *Landscape Ecology*, v. 24, p. 253-266. DOI: 10.1007/s10980-008-9303-y
- Rescia, A.J.; Astrada, E. N.; Bono, J.; Blasco, C. A.; Melli, P.; Adamoli, J. M. (2005). Environmental analysis in the selection of alternative corridors in a long-distance linear project: a methodological proposal. *Journal of Environmental Management*, v.80, p.266-78. DOI: 10.1016/j.jenvman.2005.09.008
- Rodrigue, J. P.; Comtois, C.; Slack, B. (2006). *The geography of transport systems*, Routledge, New York
- Saaty, T.L. (1995). Transport planning with multiple criteria: the analytic hierarchy process applications and progress review. *Journal of Advanced Transportation*, v.29, n.1, p.81-126. DOI: 10.1002/atr.5670290109
- Sadagopan, G. (2000). *Web-Based Geographic Information Systems: Public Participation in Virtual Decision Making Environments*. Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- Sadasivuni, R.; Nobrega, R. A. A.; O'Hara, C. G.; Dumas, J. (2009). Transportation Corridor Case Study for Multi-Criteria Decision Analysis. *Proceedings of American Society of Photogrammetry and Remote Sensing 75th Annual Meeting*, Baltimore, MD. 2009
- Sampaio, D. M.; Elmiro, M. T.; Nobrega, R. A. A. (2014). Modelagem da dinâmica da expansão urbana no Vetor Norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte e análises sobre as novas infraestruturas viárias previstas até 2031. *Geografias*, v. 10, p. 78-99.
- Singleton, P. H.; Lehmkuhl, J. (1999). Assessing wildlife habitat connectivity in the interstate 90 Snoqualmie Pass corridor, Washington. *Proceedings of the 3rd International Conference on Wildlife Ecology and Transportation*, September, pp. 13-16.
- Stich, B.; Holland, J. H.; Nobrega, R. A. A.; O'Hara, C. G. (2011). Using multi-criteria decision making to highlight stakeholders values in the corridor planning process. *Journal of Transport and Land Use*, v. 4, p. 105-118. DOI: 10.5198/jtlu.v4i3.171
- Sharifi, M.A.; Beorboom, L.; K. B.; Shamsudin; Veeramuthu, E. L. (2006) Spatial multiple criteria decision analysis in integrated planning for public transportation and land use development study in Klang Valley, Malaysia. *Proceedings of the ISPRS Technical Commission II Symposium*, Vienna, 2002, p. 85-91.
- Tripp, J.; Alley, N. (2004). Streamlining NEPA's environmental review process: Suggestions for agency reform. *New York University Environmental Law Journal*, 12(1):74-110. URL <http://www1.law.nyu.edu/journals/envtlaw/issues/vol12/index.html>.
- UNITED STATES, GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE. A. O., 2011. *Surface Freight Transportation: A comparison of the Costs of Road, Rail, and Waterways Freight Shipments That Are Not Passed on to Consumers*. Washington D. C.: UNT Digital Library.
- UNITED STATES, Department of Transportation (2008). *Transportation Equity Act of the 21st Century: Moving Americans into the 21st Century*. URL <http://www.fhwa.dot.gov/tea21/index.htm>.