

# **Avaliação de alocação de traçados de Linhas de Transmissão no Brasil de acordo com a Portaria Interministerial 419/2011 utilizando lógica *fuzzy***

José Guilherme Fronza

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
jose.fronza@inpe.br

Resumo. A necessidade de construção de Linhas de Transmissão no Brasil se baseia na análise de operação do SIN – Sistema Interligado Nacional operado pelo ONS. O planejamento, projeto e construção de Linhas de Transmissão parte do princípio de ponderação de informações fundiárias, ambientais e de engenharia onde o melhor traçado para interligar duas regiões é proposto de forma integrada e equilibrada. A compilação e posterior cruzamento destas informações tem caráter crucial para definição do traçado de interligação de duas subestações e a constantes alterações de traçados tornam a tomada de decisão constantemente mais complexa, gerando o questionamento se os traçados definidos para grandes Linhas de Transmissão no Brasil observaram critérios de distanciamento de áreas de interesse. Este trabalho buscou verificar em três estudos de caso de Linhas de Transmissão já construídas, obtidas por dados georreferenciados do PNLT (Plano Nacional de Logística e Transportes) e informações disponibilizadas por IBAMA, FUNAI, FCP, etc. se o traçado proposto e instalado seguiu os critérios de interesse socioambiental para distanciamento, considerando o cruzamento de bases de dados e legislação vigente, através de lógica *fuzzy* e seus operadores.

**Palavras-chave:** lógica *fuzzy*, Linhas de Transmissão, licenciamento ambiental, Portaria Interministerial 419/2011.

## **1. Introdução**

Em meados da década de 1990, a partir de um projeto de reestruturação do setor elétrico brasileiro, denominado RESEB, o Ministério de Minas e Energia preparou as mudanças institucionais e operacionais que culminaram no atual modelo do setor de energia elétrica no país. A estrutura de funcionamento do setor é concebida sob um ideal de equilíbrio institucional entre agentes do governo, agentes públicos e privados. Para que uma linha de transmissão possa operar, ela necessita de uma concessão, obtida a partir de uma licitação. As regras do regime de concessão estão regulamentadas pela Lei nº 8.987/95, que define que o poder concedente deverá regulamentar o serviço concedido e fiscalizar permanentemente a sua prestação, além de estimular o aumento da qualidade, produtividade, preservação do meio ambiente e conservação (Art. 29). A concessão para operar o sistema de transmissão é firmada em contrato com duração de 30 anos. Os procedimentos licitatórios das concessões são balizados pela Agência Nacional de

Energia Elétrica (ANEEL), responsável pela regulação e fiscalização da produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica no Brasil.

### **1.1. Geração**

A geração é o segmento da indústria de eletricidade responsável por produzir energia elétrica e injetá-la nos sistemas de transporte (transmissão e distribuição) para que chegue aos consumidores. Segundo dados da ANEEL, atualmente o Brasil conta com 2.661 empreendimentos geradores de energia. A maioria desses empreendimentos (1.570) são usinas termelétricas de médio porte, movidas a gás natural, biomassa, óleo combustível e carvão mineral. Apesar disso, praticamente 70% da capacidade instalada no país, e 74% da energia gerada, são de origem hidrelétrica e limpa, contando com 199 empreendimentos de grande porte, 418 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) e 385 micro usinas hidrelétricas.

### **1.2. Transmissão**

O segmento de transmissão é aquele que se encarrega de transportar grandes quantidades de energia provenientes das usinas geradoras. No Brasil, esse segmento conta com aproximadamente 77 concessionárias, responsáveis pela administração e operação de mais de 100.000km de LT espalhadas pelo país, conectando os geradores aos grandes consumidores ou, como é o caso mais comum, às empresas distribuidoras. O segmento de distribuição, por sua vez, é aquele que recebe grande quantidade de energia do sistema de transmissão e a distribui para consumidores pequenos e médios.

A necessidade de construção de Linhas de Transmissão no Brasil se baseia na análise de operação do SIN – Sistema Interligado Nacional operado pelo ONS, onde há distribuição de energia das regiões produtoras (forte predominância de usinas hidrelétricas) de energia para os grandes centros consumidores. O planejamento, projeto e construção de Linhas de Transmissão parte do princípio de ponderação de informações **fundiárias** (cadastro e indenização de propriedades interceptadas, etc.), **ambientais** (proximidade com Unidades de Conservação, Terras Indígenas e Quilombos, etc.) e de **engenharia** (viabilidade construtiva – quantidade de torres, ângulos de deflexão, etc.) onde o melhor traçado para interligar duas regiões, ou

subestações de transmissão seria proposto considerando estes aspectos de forma integrada e equilibrada.

### 1.3. Legislação e viabilidade para traçados perante licenciamento ambiental

A compilação e posterior cruzamento de dados tem caráter crucial para definição do traçado de interligação de duas subestações e a constantes alterações de traçados tornam a tomada de decisão constantemente mais complexa, gerando o questionamento se os traçados definidos para grandes Linhas de Transmissão no Brasil obedeceram/observaram critérios de distanciamento de áreas de interesse.

Obedecendo a aspectos legais na tentativa de avaliar os critérios para interligação de subestações (definição de traçados) baseiam-se na Portaria Interministerial 419/2011 do Ministério do Meio Ambiente, que busca regulamentar a atuação dos órgãos e entidades envolvidos no licenciamento ambiental interministerial, entre eles: IBAMA, Fundação Cultural Palmares - FCP, FUNAI, IPHAN, Ministério da Saúde.

No constante do Anexo II apresenta uma tabela estabelecendo as principais tipologias a serem observadas para o planejamento de empreendimentos no Brasil, dividindo o Brasil em Amazônia Legal e Demais Regiões, conforme figura 1.

Tipologia	Distância km	
	Amazônia Legal	Demais Regiões
Empreendimentos Lineares (exceto rodovias):		
Ferrovias	10 km	5 km
Dutos	5 km	3 km
Linhas de Transmissão	8 km	5 km
Rodovias	40 km	10 km
Empreendimentos Pontuais (portos, mineração e termoelétricas):	10 km	8 km
Aproveitamentos Hidrelétricos (UHEs e PCHs):	40 km Ou Área de contribuição direta ou reservatório acrescido de 20 km a jusante	15 km Ou Área de contribuição direta ou reservatório acrescido de 20 km a jusante

Figura 1: Anexo II da Portaria Interministerial 419/2011.

Além destas tipologias, considerou-se a inclusão de Unidades de Conservação (MMA), Cavidades (CECAV), Terras Indígenas (FUNAI) e Territórios Quilombolas (FCP) pela sua relevância ambiental para a alocação de traçados de interligação energética no país.

Cabe ressaltar que muitos outros critérios são pertinentes e interferem bastante na definição do traçado e viabilidade ambiental do empreendimento. Os aspectos fundiários e aspectos projetivos deverão ser estudados paralelamente, buscando propor uma solução integrada e otimizada, partindo do pressuposto que estes três eixos devem ser equilibrados adequadamente para o projeto sair do papel.

## 2. Objetivos

Verificar em três estudos de caso de Linhas de Transmissão já construídas, obtidas por dados georreferenciados do PNLT (Plano Nacional de Logística e Transportes) e informações disponibilizadas por IBAMA, FUNAI, FCP, etc. se o traçado instalado seguiu os critérios de interesse socioambiental para distanciamento, considerando o cruzamento de bases de dados e legislação vigente através de informações georreferenciadas, proporcionando a tomada de decisão rápida e integrada ambientalmente.

### 2.1. Área de Estudo

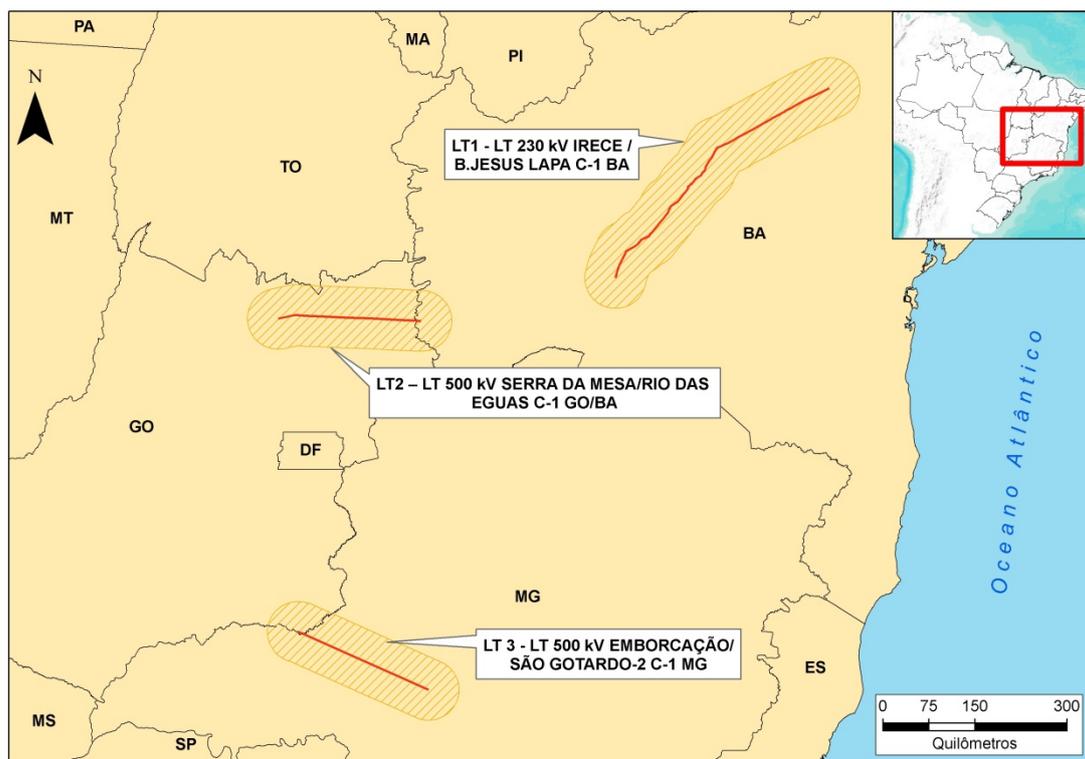


Figura 2: Figura de localização dos três traçados selecionados.

Para este estudo foram selecionados três LT já implantadas nos estados da Bahia, Minas Gerais e Goiás. A LT 1 é a 230kV Irecê/Bom Jesus da Lapa circuito 1 com sua área de

influência de 50km para cada lado. Está localizada no estado da Bahia e possui aproximadamente 491 km de extensão.

A LT 2 é a 500kV Serra da Mesa/Rio das Éguas circuito 1 que interliga as subestações com o mesmo nome entre os estados de Goiás e Bahia. Possui cerca de 234 km de extensão. A LT 3 é a LT 500kV Emborcação/São Gotardo e está localizada no estado de Minas Gerais, com cerca de 235km de extensão.

Para cada traçado analisado efetuou-se a operação de um buffer com 50 km de extensão para cada lado, totalizando 100 km a partir do traçado, objetivando delimitar a área estudo onde se avaliou o peso das variáveis ambientais selecionadas como superfície de decisão, discutida no próximo item.

### 3. Materiais e métodos

Para a elaboração deste trabalho inicialmente foram compiladas as informações georreferenciadas disponibilizadas pelos órgãos intervenientes no licenciamento ambiental de linhas de transmissão de acordo com a Portaria Interministerial 419/2011 e demais (FCP, INCRA/FUNAI, CECAV). A tabela 1 relaciona as bases utilizadas, quem produziu o dado, representação vetorial do geo-objeto e escala presumida.

**Tabela 1 – Dados georreferenciados compilados para realizar a avaliação de traçados**

<b>Identificação</b>	<b>Fornecedor</b>	<b>Representação Vetorial</b>	<b>Escala presumida</b>	
1	Cavidades	CECAV	Ponto	Não informada
2	Extração Mineral	IBGE	Área	1:250.000
3	Extração Mineral	IBGE	Ponto	1:250.000
4	Eixo Dutoviário	PNLT 2010	Linha	1:1.000.000
5	Eixo Ferroviário	PNLT 2010	Linha	1:1.000.000
6	Hidrelétricas	IBGE	Ponto	1:250.000
7	Termelétricas*	IBGE	Ponto	1:250.000
8	Transmissão	IBGE	Linha	1:250.000
9	Terminais Portuários	PNLT 2010	Ponto	1:1.000.000
10	Quilombolas	INCRA/FCP	Ponto	Não informada
11	Terras Indígenas	FUNAI	Área	Não informada
12	Terras Indígenas (Estudo)	FUNAI	Ponto	Não informada
13	Trechos Rodoviários	PNLT 2010	Linha	1:1.000.000
14	Unidades de Conservação	MMA	Área	Não informada

\*Termelétricas não foram consideradas na aplicação devido ao distanciamento muito grande da área de estudo.

Para apresentar de forma mais clara os procedimentos adotados em cada cruzamento de dados neste trabalho, foi gerado o modelo OMT-G (Figura 3).

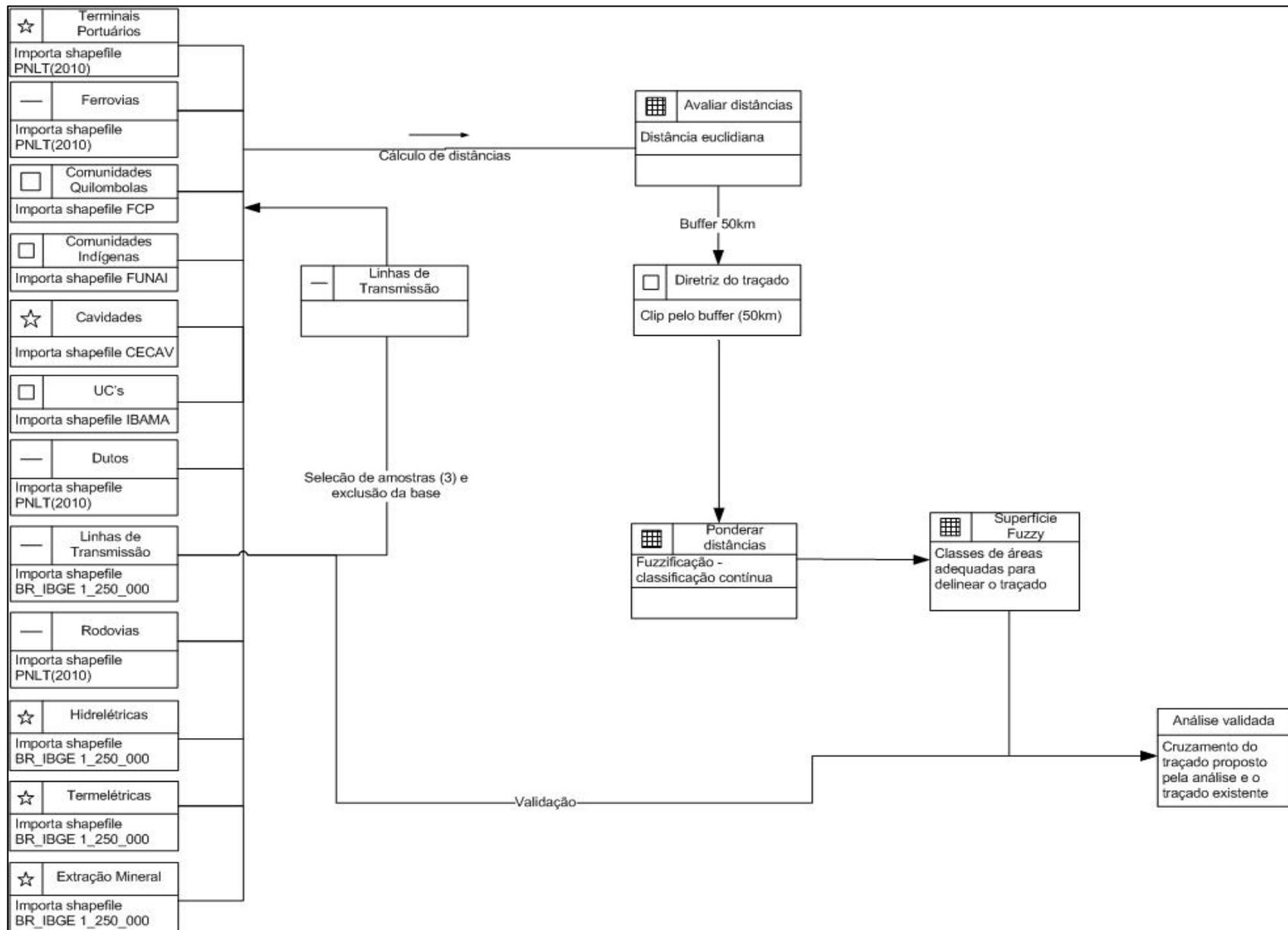
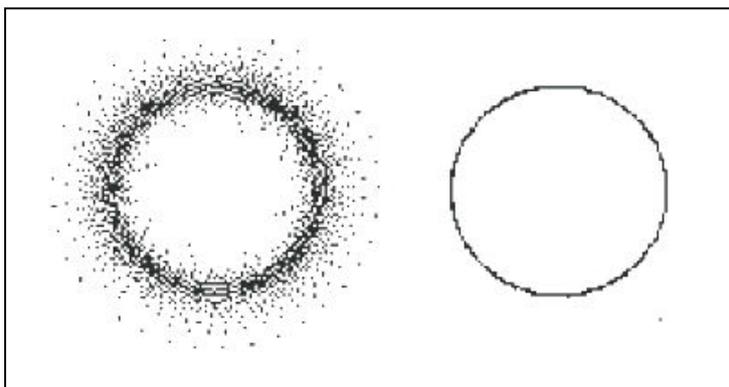


Figura 3: Modelo OMT-G utilizado para estruturar os métodos propostos neste trabalho.

As restrições impostas na Portaria 491/2011 e demais restrições legais (cavidades, UCs, Quilombos, Terras Indígenas) são normalmente tratadas no âmbito jurídico como decisões bem definidas. Estipular distâncias arbitrárias e booleanas (sim-não, 500metros, 1000metros) faz sentido no papel, mas quando temos o processo de tomada de decisão, neste caso, estipular o traçado de Linhas de Transmissão, baseado em muitas variáveis fica extremamente difícil trabalhar com regras de decisão booleanas. Já na abordagem *fuzzy* (lógica nebulosa) as imprecisões caracterizam as classes que podem ter ou não fronteiras bem definidas. Burrough (1998) recomenda a utilização dessas técnicas para tratar de fenômenos ambíguos, vagos ou ambivalentes em modelos matemáticos ou conceituais. Assim, diferentemente da teoria clássica de conjuntos, onde uma função de pertinência é definida como verdadeira ou falsa, ou seja, 1 ou 0, o grau de pertinência do conjunto *fuzzy*, é expresso em termos de escala que varia continuamente entre 0 e 1. Indivíduos próximos ao conceito central tem valores da função de pertinência próximos de 1, os que estão distantes recebem valores menores, próximos de 0.

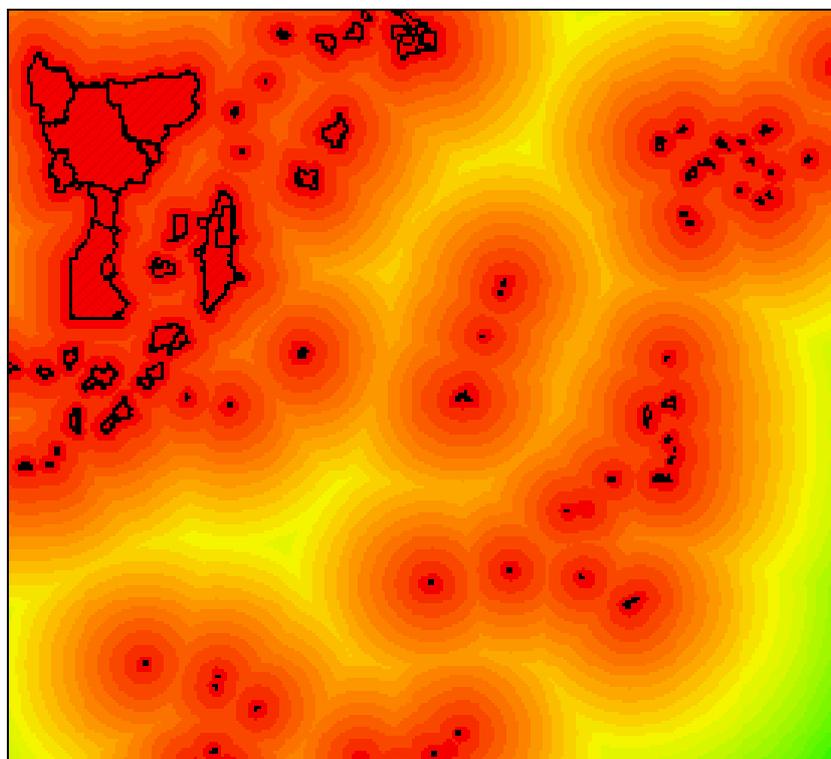
Assim como em conjuntos booleanos, dados em conjuntos *fuzzy* podem ser manipulados utilizando métodos lógicos para selecionar e combinar dados de vários conjuntos. Vários operadores podem ser utilizados de forma a se obter um mapa resultante da sobreposição de vários planos de Informação *fuzzy*. Para o caso de cruzamento de mapas temáticos, Meirelles (1997) lista os seguintes operadores *fuzzy*: **AND**, **OR**, **Soma Algébrica**, **Produto Algébrico** e **Gamma**.



**Figura 4:** Conceito de fronteira utilizando lógica *fuzzy* (esquerda) e lógica booleana (direita). Adaptado de Câmara et al(2007).

Este trabalho busca avaliar o traçado implantado, sendo, portanto, muito mais adequada a utilização da lógica *fuzzy* para gerar as superfícies de decisão onde o processo de tomada de decisão possa ocorrer avaliando múltiplos critérios e múltiplos traçados, permitindo assim assegurar maior grau de realismo na abstração proposta de alocação de traçados baseada em pesos de variáveis.

Partindo deste pressuposto, foi realizada a rasterização dos dados vetoriais da base cartográfica (Tabela 1) em matrizes com células de 500x500m considerando a distância euclidiana das fontes (feições) para uma superfície matricial. Um exemplo é dado na figura 5 considerando as Terras Indígenas da área de estudo e o distanciamento euclidiano computado para cada célula da matriz (500x500).



**Figura 5: Cálculo de distância euclidiana para a representação vetorial de Terras Indígenas para a matriz de distâncias.**

Após realizar este procedimento para todos os dados compilados, o resultado (matricial) foi recortado para a área de estudo (50 km para cada lado a partir do traçado da LT) gerando assim valores de distância euclidiana para cada célula na superfície de decisão.

Para realizar o procedimento de “fuzzificação” das distâncias, ou seja, para que os valores de distâncias recortados para a área de estudo estejam entre 0 e 1, foi realizada uma fuzzificação linear. Consiste na aplicação da função que faz o mapeamento dos valores de distância entre 0 e o valor máximo para cada matriz e o posterior reescalonamento dos valores entre 0 e 1.

A figura 6 ilustra de maneira clara a diferença entre a abordagem booleana produzida seguindo o critério legal de forma rígida e a abordagem *fuzzy*, utilizando como exemplo uma das variáveis consideradas (ferrovias – linhas), onde existe uma regra clara de decisão do que é permitido e o que não é (5 km) e a superfície contínua *fuzzy* com valores entre 0 e 1, onde 0 são as áreas em vermelho (mais restritas) e em verde os valores próximos de 1 (menos restritos, ideais para alocação).

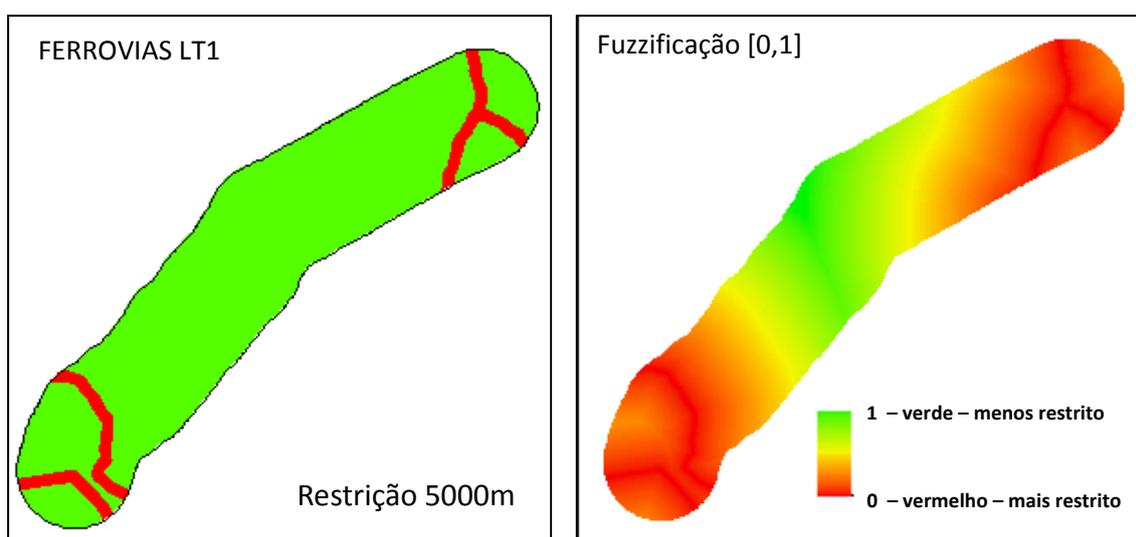


Figura 6: Exemplo da diferença dos resultados de aplicação de lógica booleana e lógica *fuzzy* neste trabalho.

#### 4. Resultados e Conclusões

Os resultados obtidos para cada LT foram analisados de forma separada, gerando produtos de acordo com os operadores *fuzzy* utilizados. Para a LT 1 – 230kV Irecê/Bom Jesus da Lapa Circuito 1 com aproximadamente 491km de extensão, o resultado obtido para os operadores Gamma (índice Gamma de 0.9) e AND foram os melhores, onde foi possível delimitar de maneira simplificada uma sugestão de traçado que passaria mais ao sul em grande parte do trecho de interligação das subestações. De acordo com a

figura 7, o traçado existente (IBGE 1:250.000) é o que está em azul e o traçado delimitado com alternativa locacional é o traçado em magenta. Os operadores *fuzzy* Gamma e AND foram os que consideraram alguma alocação de áreas menos restritas para o traçado. Outros operadores (Soma Algébrica e Produto Algébrico) ou foram muito restritivos ou foram muito permissivos, conforme figura 8.

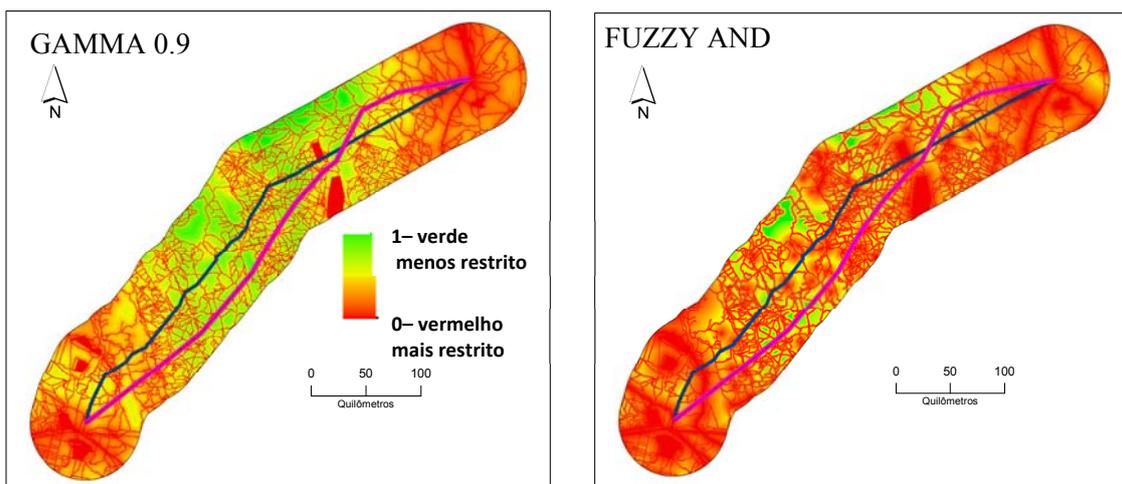


Figura 7: Exemplo da diferença dos resultados na LT 1 para os operadores *fuzzy* Gamma e AND.

A utilização da base cartográfica georreferenciada de rodovias na escala 1:250.000 e a restrição legal de 10km para a alocação de traçados praticamente inviabiliza a área inteira para implantação. Ao aplicarmos a lógica booleana (áreas permitidas e não permitidas) haveria conflito que dificilmente poderia ser contornado. Com a aplicação da lógica nebulosa, o peso da restrição das rodovias é ponderado como superfície juntamente com o restante, perdendo parte de seu peso para restrição, sendo, portanto mais realista.

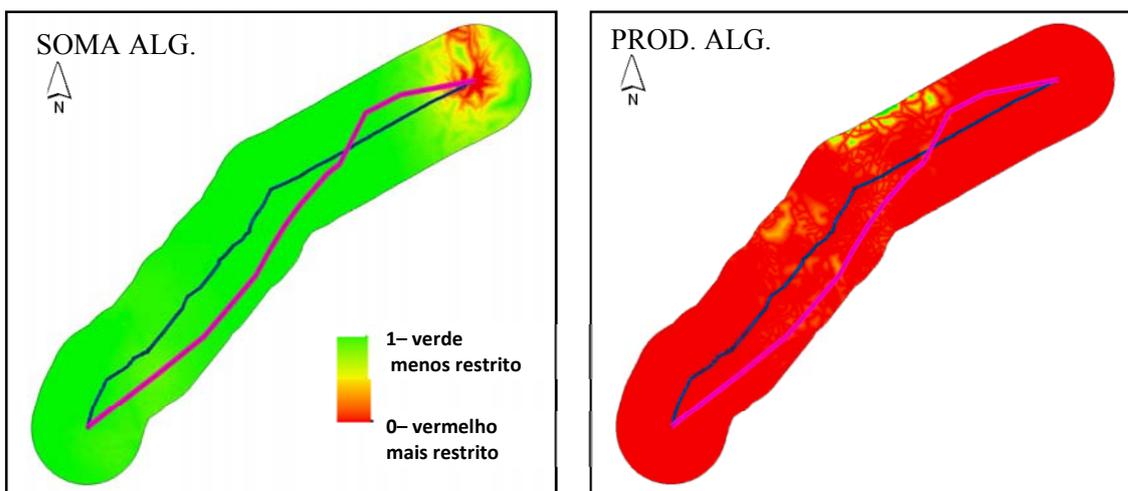


Figura 8: Resultados na LT 1 para os operadores *fuzzy* Soma Algébrica e Produto Algébrico.

Para a LT 2 – 500kV Serra da Mesa/Rio das Éguas circuito 1 (aproximadamente 234km de extensão) existem bastante Unidades de Conservação de proteção parcial e integral que proporcionaram uma área restrita bastante considerável para alocação do traçado. É possível perceber pela figura 9 que o traçado implantado é praticamente reto (menor custo), sendo provavelmente construída, antes de restrições ambientais tomarem importância no cenário nacional. A simulação de um traçado ambientalmente menos impactante (alternativa desenhada em magenta) foi proporcionada novamente utilizando os produtos Gamma e AND da lógica nebulosa, permitindo avaliar áreas menos restritas para o traçado. Cabe salientar a importância da subestação de Serra da Mesa, sendo o único elo entre os subsistemas Sul/Sudeste/ Centro-Oeste e Norte/Nordeste do SIN.

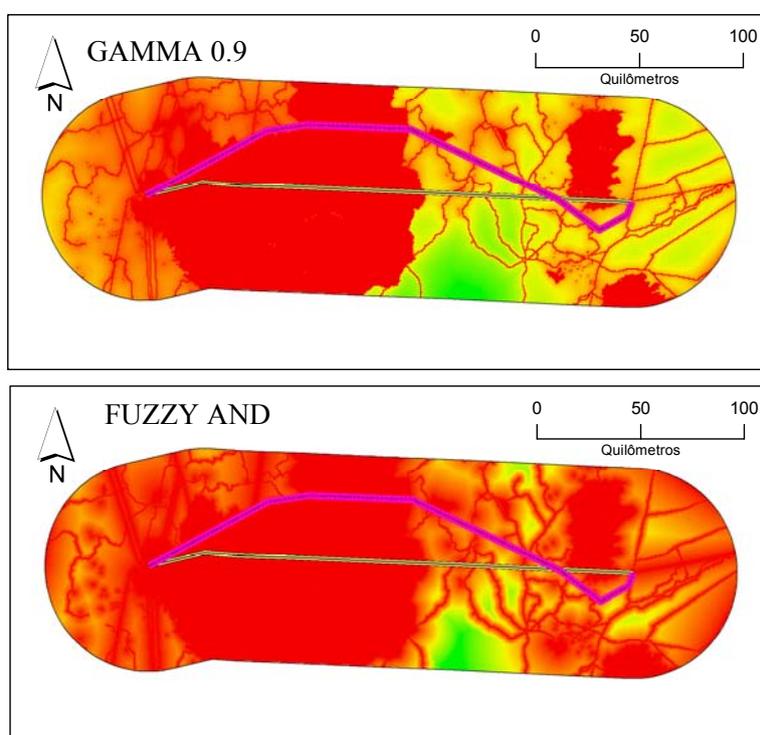


Figura 9: Resultados na LT 2 para os operadores *fuzzy* Gamma e AND.

Cabe aqui destacar que quanto mais variáveis inserirmos para modelar a avaliação de áreas ideais para alocação do traçado, mais restritivo, complexo e real ficaria o modelo. Neste caso da LT 2 temos alterações no padrão de cobertura (vegetação arbustiva e cultivos agrícolas) e também a presença de reservatórios, que inviabiliza a passagem da LT (ou pelo menos encarece muito o projeto), devendo ser avaliados também.

Por fim, temos a LT 3 – 500kV Emborcação/São Gotardo Circuito 1 em Minas Gerais com aproximadamente 235km de extensão. Novamente os operadores *fuzzy* Gamma e o AND apresentaram resultados onde foi possível distinguir bem áreas de menor e maior restrição. Na figura 10 é possível visualizar o traçado implantado (reto) e o traçado desenhado, pensando em atender as restrições ambientais de forma mais equilibrada.

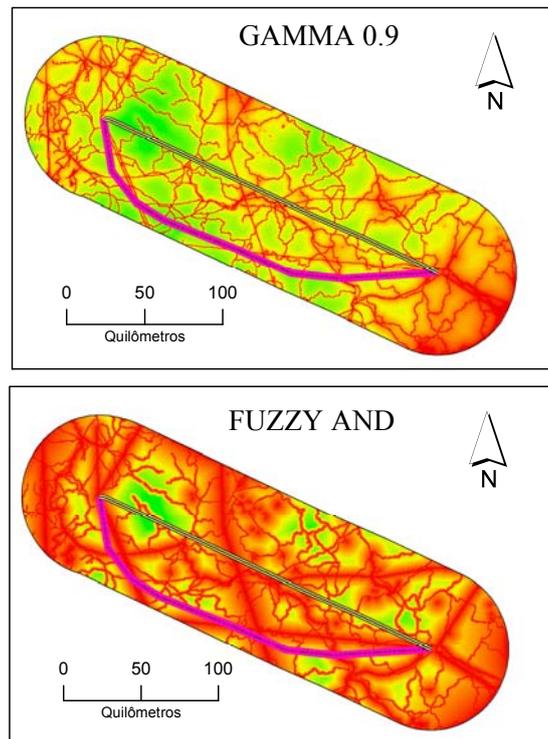


Figura 10: Resultados na LT 3 para os operadores *fuzzy* Gamma e AND.

Os operadores Produto Algébrico e Soma Algébrica apresentaram o mesmo comportamento para a LT 2 e 3, ou seja a soma algébrica foi pouco restritiva e o produto algébrico muito restritivo, impossibilitando a discretização de áreas adequadas/inadequadas para a alocação de traçados.

Este trabalho visou contribuir de forma inovadora na discussão de alocação de traçados de Linhas de Transmissão do SIN no país. Percebe-se a dificuldade de definir o traçado do projeto, devido às múltiplas variáveis inter-relacionadas a serem consideradas no processo de tomada de decisão. A lógica booleana se mostrou inadequada neste caso (como é para o mundo real) onde a legislação não permite avançar caso não haja alternativa de traçado e a LT tenha que passar mesmo assim.

Cabe ressaltar que buscar o melhor traçado considerando apenas os aspectos ambientais é fortemente desaconselhável, pois ao final do processo, podemos ter um traçado ambientalmente consistente, mas impossível de implantar devido ao alto custo, reiniciando o processo do começo. Os critérios fundiários necessitam de intensas negociações conduzidas corretamente, visto que o processo de cadastramento e indenização de proprietários é moroso, podendo atrasar o cronograma do projeto e gerando prejuízos para a concessionária (passível de multas pela ANEEL). Maiores aprofundamentos da aplicação da lógica *fuzzy* no processo de tomada de decisão de alocação de traçados seria o ideal, buscando obter e embasar alternativas locais no âmbito do licenciamento ambiental.

## Referencias Bibliográficas

Aplicação de Técnica *Fuzzy* em SIG como alternativa para o Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE) Maria Isabel Sobral Escada. – Disciplina Análise Espacial – INPE 1998.

CÂMARA, G.; MOREIRA, F. R.; BARBOSA, C.; FILHO, R. A.; BÖNISCH, S. Técnicas de Inferência Geográfica. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. Introdução à Ciência da Geoinformação. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.html>> Acesso em: 05/06/2015.

EIA/RIMA LT 500kV Estreito Itabirito 2 – Abengoa Brasil – Disponível em [http://www.abengoabrasil.com/export/sites/abengoabrasil/resources/pdf/RIMA\\_Relatorio\\_de\\_Impacto\\_Ambiental\\_Abengoa\\_Brasil.pdf](http://www.abengoabrasil.com/export/sites/abengoabrasil/resources/pdf/RIMA_Relatorio_de_Impacto_Ambiental_Abengoa_Brasil.pdf). Acesso em 09/06/2015

Inferência Geográfica – Classificação Contínua, Aula 12 – Professor Cláudio Barbosa – SER 300 – INPE, 2015. Disponível em <http://wiki.dpi.inpe.br/doku.php?id=ser300:aulas-ser300-2015>. Acesso em 09/06/2015

Ministério do Meio Ambiente - PORTARIA INTERMINISTERIAL Nº 419, DE 26 DE OUTUBRO DE 2011. [http://www.imovelweb.com.br/propriedades/apartamento-para-aluguel-no-jardim-esplanada-ii-2923327190.html?utm\\_source=lead&utm\\_medium=email](http://www.imovelweb.com.br/propriedades/apartamento-para-aluguel-no-jardim-esplanada-ii-2923327190.html?utm_source=lead&utm_medium=email)