

LÓGICA FUZZY PARA OBTENÇÃO DO ÍNDICE DE PRIORIDADE PARA INTERVENÇÃO NO PASSIVO AMBIENTAL DE SEGMENTOS DE RODOVIAS PAVIMENTADAS

Sandro Filippo – M.Sc.

Programa de Engenharia de Transportes - COPPE/UFRJ

Vladimir Lima da Silva – M.Sc.

Programa de Engenharia de Transportes - COPPE/UFRJ

André Burlamaqui Machado

Programa de Engenharia de Produção - COPPE/UFRJ

Carlos Alberto Nunes Cosenza – Ph.D.

Programa de Engenharia de Produção - COPPE/UFRJ

Suzana Kahn Ribeiro – Ph.D.

Programa de Engenharia de Transportes - COPPE/UFRJ

RESUMO

Diversos aspectos inerentes às atividades de implantação e operação devem ser considerados para minimizar os impactos ambientais nas áreas de influência de um empreendimento rodoviário. Condições gerais da via e dos sistemas de drenagem, estado da cobertura vegetal, tipo e estado do solo, risco climático entre outros, constituem exemplos destes aspectos. O objetivo deste trabalho é o de apresentar uma nova abordagem para a metodologia adotada pelo Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes – DNIT, que determina um Índice de Prioridade (IP) para o gerenciamento do passivo ambiental de segmentos de rodovias pavimentadas. O modelo construído mantém as variáveis e parâmetros do DNIT; contudo, é baseado na aplicação de heurística e da “Lógica Fuzzy”. Combinadas, essas técnicas permitem uma maior acurácia nas análises dos resultados do IP, e ainda, o estabelecimento de “ranking” para priorização de intervenções e a adoção de planos estratégicos.

ABSTRACT

Several inherent aspects to the implantation activities and operation should be considered to reduce the environmental impacts in the areas of influence of a highway project. General conditions of the road and of the drainage systems, state of the vegetable covering, type and state of the soil, climatic risk among other, constitute examples of these aspects. The objective of this paper is to present a new approach for the methodology adopted by the National Department of Infrastructure of Transportes - DNIT, which determines an Index of Priority (IP) for the administration of the environmental passive of paved highways segments. The built model maintains the variables and parameters of DNIT; however, it is based on the heuristics application and of the "Fuzzy Logic". Combined, those techniques allow a larger precision in the analyses of the IP results, and still, the "ranking" establishment to prioritize the interventions and the adoption of strategic plans.

1. INTRODUÇÃO

A implantação e a operação de empreendimentos de transporte, principalmente rodoviários, têm levado à situações de degradação ambiental nas faixas lindeiras e de domínio das rodovias, causando prejuízos ao próprio empreendimento, que também extrapolam, em muitos casos, a área de influência direta do projeto (Fogliatti *et al.*, 2004).

A avaliação dos efeitos resultantes de práticas anteriores mal planejadas ou concebidas de um empreendimento rodoviário, principalmente das atividades decorrentes da implantação e conservação de rodovias, constitui atualmente um fator de extrema importância nas atividades de engenharia rodoviária. Verifica-se, portanto, a necessidade de serem estabelecidas diretrizes para o gerenciamento do passivo ambiental gerado por tais atividades. O passivo ambiental corresponde, de maneira bastante simples, ao acúmulo da degradação dos componentes ambientais (como solo, cobertura vegetal, água e ar) das atividades de implantação e operação de um empreendimento, e que deve ser recuperado para que possa estar de acordo com as boas práticas estabelecidas e firmadas nos estudos e planos ambientais elaborados na fase de licenciamento do empreendimento.

Muitos efeitos adversos ao meio ambiente gerados pelas atividades de implantação e operação de empreendimentos rodoviários são decorrentes da falta do gerenciamento das atividades de controle e monitoramento dos impactos ambientais, de modo que se possam priorizar as intervenções a serem realizadas, tendo em vista a escassez de recursos financeiros. Ao operador rodoviário cabe além do gerenciamento da via como garantia da segurança e do conforto dos usuários que nela trafegam, a responsabilidade pela proteção ambiental, evitando ou mitigando os impactos negativos causados pelas atividades associadas à operação e à conservação rodoviária. Somados a estes se têm os impactos “herdados”, que constituem o passivo ambiental originados na fase de implantação da rodovia, como áreas degradadas (jazidas, caixas de empréstimo e bota-foras), que não foram restauradas ao final das obras.

Um dos poucos estudos propostos para o gerenciamento do passivo ambiental de rodovias, pode ser encontrado no Manual Rodoviário de Conservação, Monitoramento e Controle Ambientais do extinto DNER, elaborado no ano de 1996. O manual apresenta a proposta de um método pioneiro de trabalho para o gerenciamento do passivo ambiental de malhas viárias, com base em levantamentos de campo, de modo que seja possível obter um índice de prioridade que permite a classificação ordinal da aplicação dos recursos disponíveis, para segmentos rodoviários. Segundo o manual, a metodologia criada é empírica, devendo sofrer correções, adaptações e aperfeiçoamentos com o uso. Atualmente esta metodologia é apresentada no Manual de Instruções de Proteção Ambiental das Faixas de Domínio e Lindeiras das Rodovias Federais (DNIT, 2005).

2. METODOLOGIA DO DNIT PARA PRIORIZAÇÃO DE INTERVENÇÕES NO PASSIVO AMBIENTAL DE RODOVIAS

A metodologia do DNIT para priorização de intervenções no passivo ambiental de rodoviários baseia-se na caracterização dos trechos rodoviários homogêneos que compõem a malha, em função dos parâmetros: características operacionais da rodovia, características ambientais da rodovia (e seu entorno) e indicadores sócio-econômicos. Segundo o próprio Manual Rodoviário de Conservação, Monitoramento e Controle Ambientais, o enfoque da metodologia desenvolvida pelo DNIT não é restrito somente aos aspectos ambientais dos empreendimentos rodoviários, mas visa à obtenção do ponto de equilíbrio entre interesses ambientais (meios físico, biológico e ecossistemas naturais) e sócio-econômicos.

O Índice de Prioridade (IP) proposto pelo DNIT é calculado para cada segmento rodoviário considerado homogêneo e determina posteriormente um nível de intervenção corretiva ou preventiva. Este índice é obtido a partir de dois índices calculados previamente, denominados Índice Técnico (IT) e Índice de Risco (IR). O IT leva em conta as condições gerais de conservação da via, da pista, do acostamento e do sistema de drenagem, bem como o volume médio de tráfego diário e as características de interesse antrópico (interesse estratégico, interesse sócio-econômico e os riscos de danos ambientais em áreas protegidas por lei). O IR leva em conta as características geo-ambientais (tipo/estado de solo e cobertura vegetal) e climáticas (em função da precipitação média anual). A obtenção do Índice de Prioridade para cada segmento rodoviário homogêneo permite definir uma ordem de prioridade para as intervenções corretivas/preventivas e é feita com a interação dos parâmetros de caracterização da rodovia apresentados na Figura 1.

O diagrama abaixo apresenta de maneira resumida e objetiva os parâmetros de entrada e saída da metodologia adotada pelo DNIT para obtenção do Índice de Prioridade (IP).

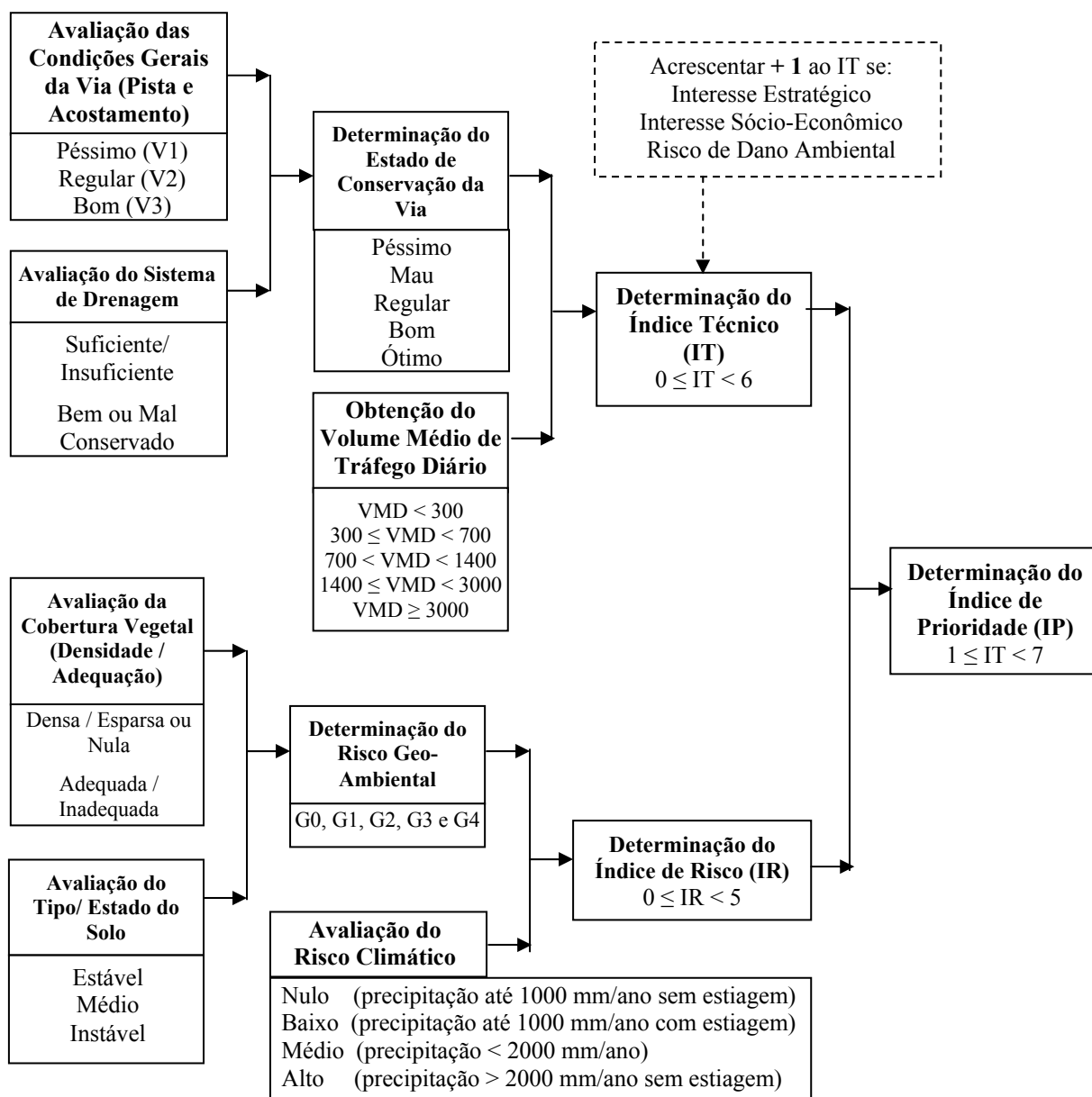


Figura 1: Metodologia do DNIT para cálculo do Índice de Prioridade.

Os parâmetros são mensuráveis ou avaliados de modo quantitativo e qualitativo no campo, sendo descritos a seguir, conforme DNER (1996):

- *Volume de Tráfego*: dado em veículos/dia (VMD) e indiretamente também envolve fatores como importância da rodovia, potencial de desgaste da via e risco de acidentes.
- *Estado de Conservação da Via*: envolve fatores como proteção/preservação da via, segurança/conforto do usuário e também o risco de acidentes, sendo determinado pela avaliação das condições gerais da via (pista e acostamento) e das condições do sistema de drenagem. A avaliação da condição geral da pista de rolamento é realizada de maneira visual e apresenta a seguinte classificação: BOA (superfície da pista de rolamento apresentando menos de 5 % da área com degradações), REGULAR (superfície da pista de rolamento apresentando entre 5 e 15 % da área com degradações) e PÉSSIMA (superfície da pista de rolamento apresentando mais de 15 % da área com degradações). A avaliação

da condição geral do acostamento é realizada de maneira análoga a análise da pista de rolamento, sendo que, para a condição geral da via prevalece a pior classificação entre a pista de rolamento e o acostamento. A avaliação da condição do sistema de drenagem verifica a funcionabilidade dos dispositivos (SUFICIENTE / INSUFICIENTE) e o estado geral de conservação do sistema (BEM / MAL conservado).

- *Características de Interesse Antrópico*: são parâmetros não mensuráveis em campo e visam inserir, no modelo de priorização, elementos de caráter logístico para cada trecho considerado. As características de interesse antrópico aumentam a prioridade do trecho rodoviário ponderando o Índice Técnico em + 1 ponto para cada uma das características: interesse estratégico, interesse sócio-econômico e risco de danos ambientais.
- *Índice Técnico (IT)*: é obtido pela combinação do estado de conservação da via e do volume médio diário de tráfego (VMD). É classificado em 0, 1, 2, 3, 4, 5 ou 6.
- *Tipo/Estado do Solo*: avalia a estabilidade do solo que é fortemente influenciada pela existência de condicionantes locais em função de características que podem alterar a estabilidade dos maciços. É avaliado como ESTÁVEL, MÉDIO e INSTÁVEL.
- *Cobertura Vegetal*: é avaliada em termos de densidade e adequação. A densidade corresponde à existência da cobertura vegetal e é avaliada como DENSA, ESPARSA ou NULA. A adequação é caracterizada pela presença de espécies que efetuem a proteção e coesão da camada superficial do solo, combinada com espécies capazes de firmar as camadas mais profundas, sendo avaliada como ADEQUADA ou INADEQUADA.
- *Risco Climático*: é avaliado pelo item mais significativo para conservação de rodovias que é a intensidade/duração das precipitações, que afetam os fenômenos de erosão, alagamento e desestabilização do solo por saturação implicando em riscos significativos à rodovia e ao meio ambiente. É avaliado como NULO (precipitação até 1000 mm/ano sem estiagem), BAIXO (precipitação até 1000 mm/ano com estiagem), MÉDIO (precipitação < 2000 mm/ano) e ALTO (precipitação > 2000 mm/ano).
- *Risco Geo-Ambiental*: é obtido pela combinação dos resultados da avaliação da Cobertura Vegetal e do Risco Climático. É classificado como G0, G1, G2, G3 e G4 (do menor para o maior risco geo-ambiental).
- *Índice de Risco (IR)*: é obtido pela combinação do risco climático e do risco geo-ambiental. É classificado discretamente em 0, 1, 2, 3, 4 ou 5.
- *Índice de Prioridade (IP)*: é obtido pela combinação do Índice Técnico com o Índice de Risco. É classificado discretamente em 1, 2, 3, 4, 5, 6 ou 7.

3. LÓGICA FUZZY

A Lógica Fuzzy nasceu em 1965 a partir da publicação do artigo intitulado *Fuzzy Sets* na revista *Information and Control* por Lofti A. Zadeh da Universidade da Califórnia, Berkeley. A tecnologia Fuzzy consiste no tratamento matemático de sistemas onde a subjetividade e as características ambíguas das variáveis processadas tornam a lógica clássica de difícil modelagem e aplicação. Conjugada com a heurística, um conjunto de regras apoiadas no processo de realização de tarefas por meio do “conhecimento” obtido na solução de certos problemas, a Lógica Fuzzy pode ser utilizada para a construção da arquitetura do pensamento consensual e humano, incorporando assim a experiência de especialistas. Silva e Maia (2004) apresentam como alguns dos benefícios da aplicação da Lógica Fuzzy a flexibilidade no tratamento de variáveis qualitativas e/ou quantitativas, a facilidade de implementação computacional, e ainda, a minimização dos custos inerentes às fases de modelagem e implantação de seus algoritmos. Neste trabalho, podem ser citadas as seguintes vantagens:

- A existência de vários parâmetros de caracterização de rodovias e do meio ambiente cujas

- análises são subjetivas e até imprecisas em determinados momentos;
- Conforme Shaw e Simões (1999), a utilidade no apoio ao processo de tomada de decisão, onde as variáveis individuais não são definidas em termos exatos;
 - Determinação do Índice de Prioridade (IP) em uma escala contínua que possibilita a ordenação dos trechos rodoviários a serem recuperados e incorporando composições de variáveis qualitativas e quantitativas; e
 - As variáveis lingüísticas reduzem as variações bruscas existentes na análise de determinados parâmetros da metodologia. Como exemplo pode ser citado a avaliação da precipitação média anual para obtenção do risco climático: O valor de 2001 mm/ano pertence integralmente ao risco climático ALTO e 1999 mm/ano pertence integralmente ao risco climático MÉDIO. Na abordagem fuzzy esta passagem pode ser gradual, pois cada valor possui uma pertinência ou um grau de certeza em cada conjunto MÉDIO e ALTO.

Apesar de incorporar a experiência de especialistas, a metodologia proposta pelo DNIT carece de uma abordagem que possibilite levar em conta simultaneamente critérios quantitativos e qualitativos em sua análise, tendo em vista que muitos aspectos, principalmente ambientais, são de natureza subjetiva e possuem fronteiras ou limites não muito bem definidos. A proposta desta abordagem fuzzy para a metodologia do DNIT procura manter as regras estabelecidas por esta, não alterando as variáveis e os parâmetros utilizados.

3.1. Conjuntos Fuzzy

Na teoria dos conjuntos clássicos, ou “*crisp*”, a transição entre a pertinência e a não pertinência de um dado elemento em um conjunto é dado de forma abrupta e bem definida (Ross, 1995), ou seja, um determinado elemento pertence ou não pertence a um determinado conjunto. Na lógica fuzzy um elemento pode ser membro de um conjunto de maneira parcial, indicado por um valor ou grau de pertinência dentro de um intervalo numérico geralmente $[0,1]$. Um conjunto fuzzy é caracterizado pela sua função de pertinência. Então sendo A um conjunto fuzzy definido no universo de discurso U , cada elemento de $u \in U$ receberá um grau de pertinência com relação ao conjunto A através da função de pertinência $\mu_A(u)$. Cada conjunto fuzzy A no universo U pode ser escrito através de um conjunto de pares ordenados de um elemento genérico e seu respectivo grau de pertinência, como (Goudard, 2001):

$$A = \{(u, \mu_A(u)) / u \in U\} \quad \text{e} \quad \mu_A : U \rightarrow [0,1]$$

3.2. Sistema de Inferência e Raciocínio Fuzzy

Na lógica fuzzy, assim como na lógica convencional, podem ser definidas regras que associadas a entradas produzem saídas, ou seja, tem-se uma coleção de variáveis de entrada, uma coleção de conjuntos para a variável de saída e uma coleção de regras de inferência que as associam (Goudard, 2001). A estrutura geral de um sistema de inferência fuzzy pode ser visualizada na Figura 2.

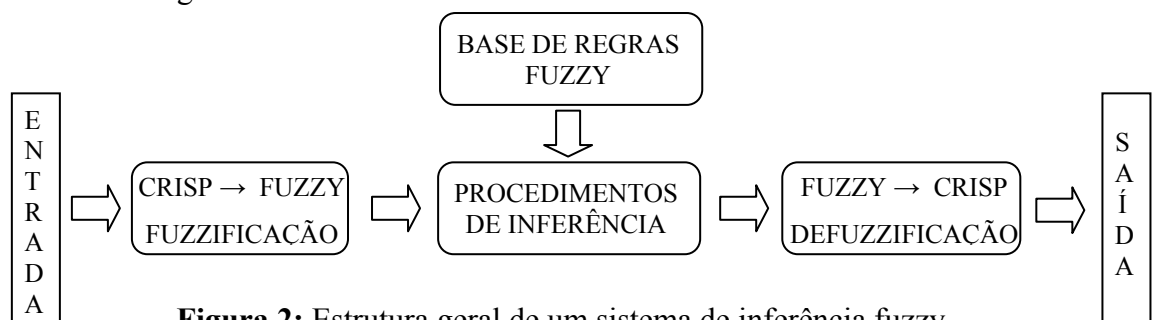


Figura 2: Estrutura geral de um sistema de inferência fuzzy.

O processo de “fuzzificação” consiste em associar um vetor lingüístico aos possíveis valores dos parâmetros, produzindo conjuntos fuzzy que retratam a imprecisão do problema, cada qual associado a uma função de pertinência, podendo este processo ser auxiliado por especialistas ou usuários do assunto em questão. Após o uso das regras e dos procedimentos de inferência realiza-se o processo de “defuzzificação” que consiste na conversão dos números fuzzy em um valor numérico (crisp) de saída, podendo ser realizada por diversos métodos como centróide e centro dos máximos.

As regras de inferência fuzzy normalmente são expressas no formato SE-ENTÃO e combinam diferentes técnicas de implicação e de agregação utilizando relações fuzzy. Uma das técnicas mais utilizadas é a chamada inferência *max-min* que utiliza o processo de implicação proposto por *Ebrahim Mamdani* em 1975, sendo conhecido como Método Mamdani de Inferência Fuzzy, que é explicado com o exemplo da Figura 3.

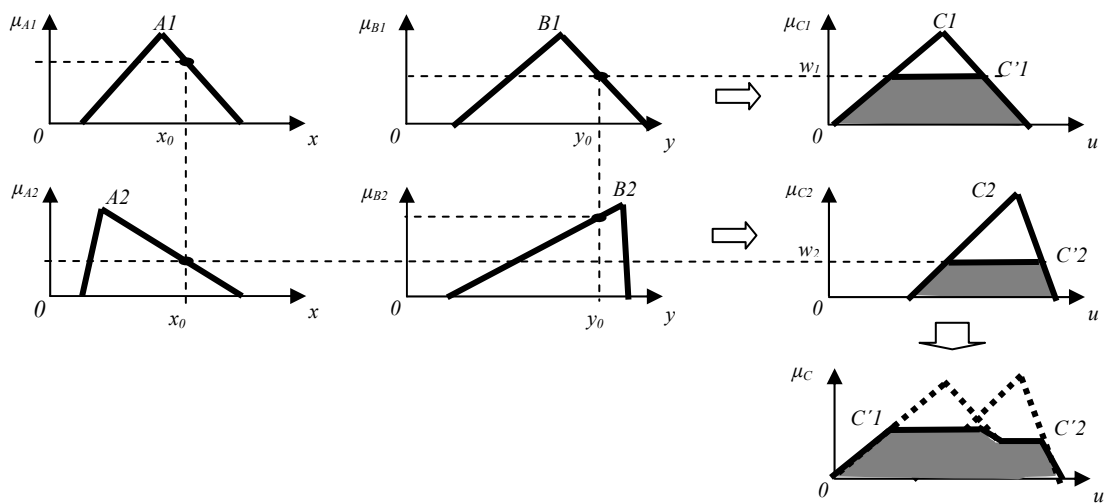


Figura 3: Exemplo do Método Mamdani de Inferência Fuzzy com duas regras.

O exemplo da figura apresenta duas regras com duas variáveis de entrada e uma de saída:

Regra 1: Se $(x = A1)$ E $(y = B1)$ ENTÃO $(u = C1)$

Regra 2: Se $(x = A2)$ E $(y = B2)$ ENTÃO $(u = C2)$

Suponha como dados de entrada os valores (x_0, y_0) . Para cada regra os conjuntos fuzzy A e B são combinados usando o operador *mín* (representado por \wedge) que corresponde ao conectivo *E*, de acordo com as regras de interseção fuzzy (operação chamada de implicação):

$$w_1 = \mu_{A1}(x_0) \wedge \mu_{B1}(y_0) \quad w_2 = \mu_{A2}(x_0) \wedge \mu_{B2}(y_0)$$

Os conjuntos fuzzy $C1$ e $C2$ são truncados pelos valores w_1 e w_2 , respectivamente, e representam a conclusão de cada regra. Ao final os conjuntos fuzzy $C1$ e $C2$ são combinados usando o operador *máx* (representado por \vee), que corresponde ao conectivo *OU* de acordo com as regras de união fuzzy (operação chamada de agregação ou composição):

$$\mu_C(u) = \mu_{C1}(u) \vee \mu_{C2}(u)$$

No final deve-se “defuzzificar” o conjunto resultante da união de $C'1$ e $C'2$ para um valor.

4. MODELAGEM DA METODOLOGIA UTILIZANDO OS CONCEITOS DA LÓGICA FUZZY

Para a modelagem foram utilizados conjuntos fuzzy triangulares e trapezoidais procurando atender, sempre que possível às observações, valores e classificações do Manual Rodoviário de Conservação, Monitoramento e Controle Ambientais do DNIT.

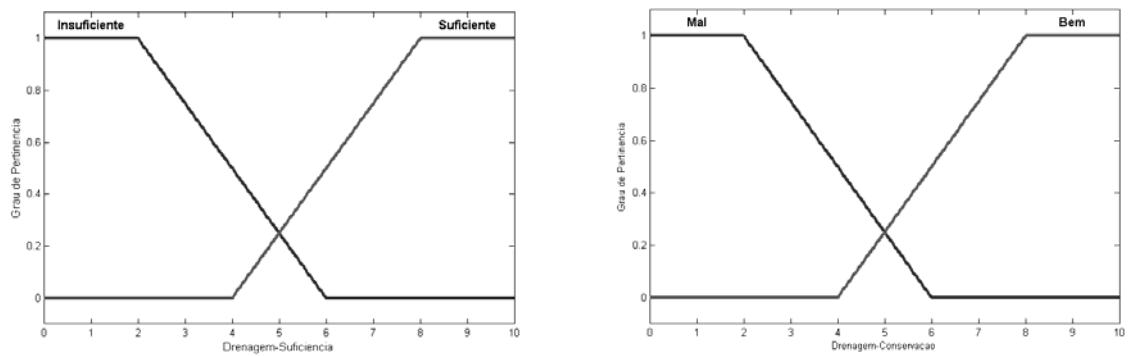


Figura 4: Conjuntos Fuzzy – Suficiência da Drenagem e Conservação da Drenagem

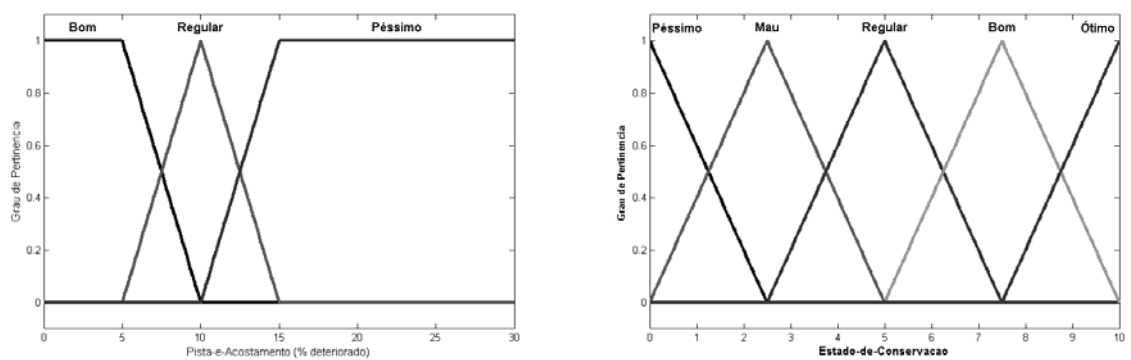


Figura 5: Conjuntos Fuzzy – Condições Gerais da Via e Estado de Conservação

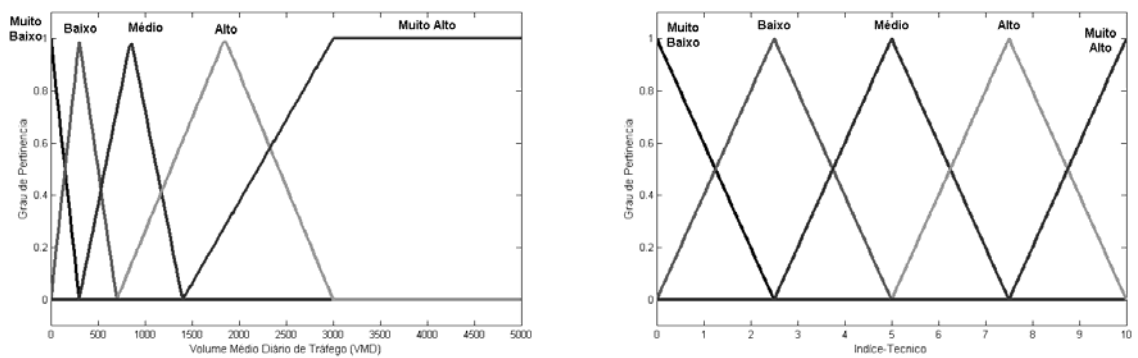


Figura 6: Conjuntos Fuzzy – Volume Médio Diário de Tráfego e Índice Técnico (IT)

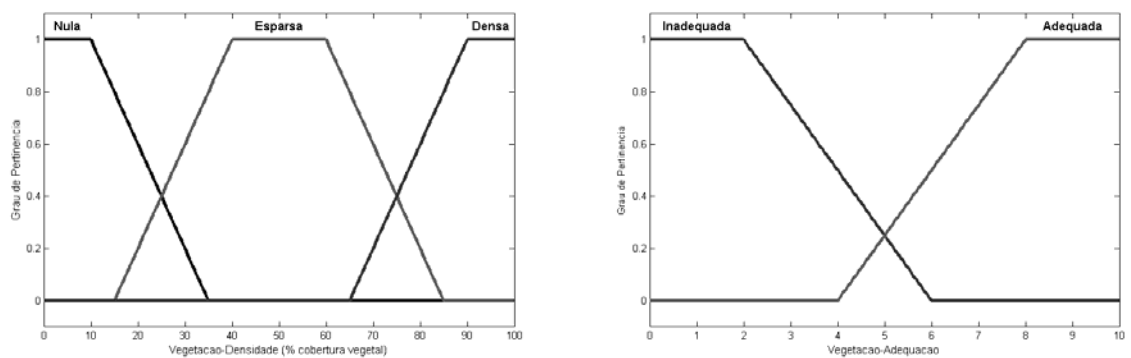


Figura 7: Conjuntos Fuzzy – Vegetação-Densidade e Vegetação-Adequação

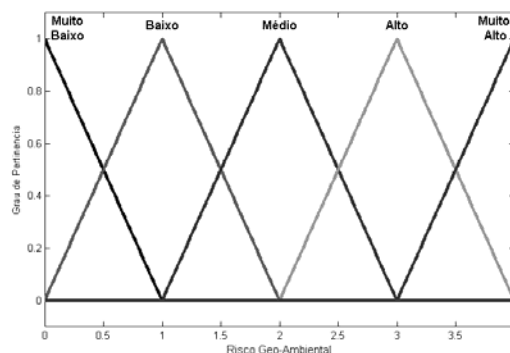
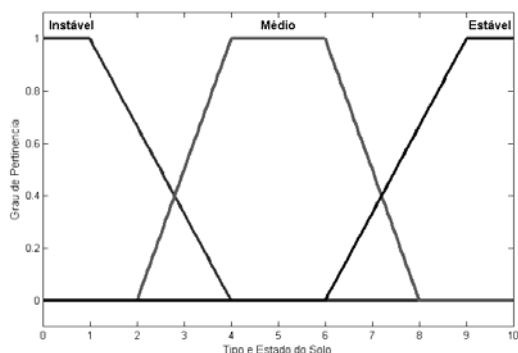


Figura 8: Conjuntos Fuzzy – Tipo e Estado do Solo e Risco Geo-Ambiental

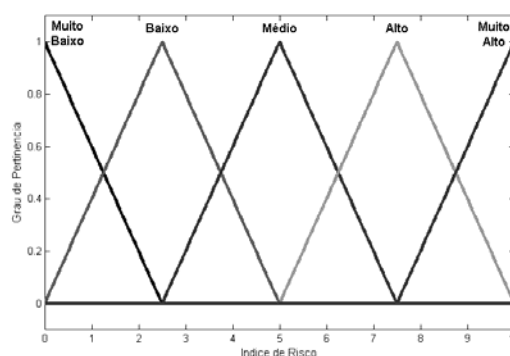
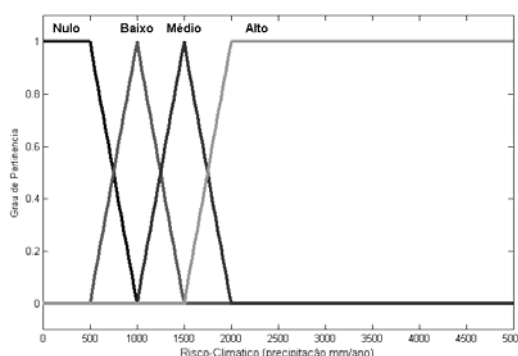


Figura 9: Conjuntos Fuzzy – Risco Climático e Índice de Risco (IR)

4.1. Mapas ou Tabelas de Regras

As regras criadas na modelagem foram baseadas nas tabelas da página 61 do Manual Rodoviário de Conservação, Monitoramento e Controle Ambientais do DNIT.

Tabela 1: Mapa das regras para obtenção do parâmetro Estado de Conservação.

| Condições Gerais da Via | Sistema de Drenagem | | | |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | Insuficiente / Mal Conservado | Insuficiente / Bem Conservado | Suficiente / Mal Conservado | Suficiente / Bem Conservado |
| Péssimo | Péssimo | Mau | | Regular |
| Regular | Mau | Regular | | Bom |
| Bom | Regular | Bom | | Ótimo |

Para o Índice Técnico os valores da metodologia do DNIT foram convertidos em variáveis lingüísticas (Tabela 2): 0/1 (Muito Baixo), 2 (Baixo), 3 (Médio), 4 (Alto), 5/6 (Muito Alto).

Tabela 2: Mapa das regras para obtenção do parâmetro Índice Técnico

| Estado de Conservação | Volume Médio de Tráfego Diário (VMD) | | | | |
|-----------------------|--------------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| | < 300 Muito Baixo | [300 – 700[Baixo | [700 – 1400[Médio | [1400 – 3000[Alto | ≥ 3000 Muito Alto |
| Ótimo | Muito Baixo | Muito Baixo | Muito Baixo | Baixo | Baixo |
| Bom | Muito Baixo | Muito Baixo | Baixo | Baixo | Médio |
| Regular | Muito Baixo | Baixo | Médio | Médio | Alto |
| Mau | Baixo | Médio | Médio | Alto | Muito Alto |
| Péssimo | Médio | Médio | Alto | Muito Alto | Muito Alto |

Da mesma forma se tem a conversão para o Risco Geo-Ambiental (Tabela 3): G0 (Muito Baixo), G1 (Baixo), G2 (Médio), G3 (Alto), G4 (Muito Alto).

Tabela 3: Mapa das regras para obtenção do parâmetro Risco Geo-Ambiental

| Tipo/ Estado do Solo | Cobertura Vegetal | | | |
|-------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|
| | Densa / Adequada | Densa / Inadequada | Esparsa / Adequada | Esparsa / Nula Inadequada |
| Estável | Muito Baixo | Baixo | | Médio |
| Médio | Baixo | Médio | | Alto |
| Instável | Médio | Alto | | Muito Alto |

Da mesma forma se tem a conversão para o Índice de Risco (Tabela 4): 0 (Muito Baixo), 1 (Baixo), 2 e 3 (Médio), 4 (Alto), 5 (Muito Alto).

Tabela 4: Mapa das regras para obtenção do parâmetro Índice de Risco

| Risco Geo- Ambiental | Risco Climático | | | |
|-------------------------|-----------------|-------------|-------|------------|
| | Nulo | Baixo | Médio | Alto |
| Muito Baixo | Muito Baixo | Muito Baixo | Baixo | Baixo |
| Baixo | Muito Baixo | Baixo | Baixo | Médio |
| Médio | Baixo | Baixo | Médio | Médio |
| Alto | Médio | Médio | Médio | Alto |
| Muito Alto | Médio | Médio | Alto | Muito Alto |

4.2. Modificações em relação à metodologia original do DNIT

Algumas modificações foram introduzidas na metodologia original proposta pelo DNIT com o intuito de facilitar a abordagem e os cálculos pela teoria dos conjuntos fuzzy:

- Padronização das escalas dos Índices Técnico, de Risco e de Prioridade (variação contínua de 0 a 10), facilitando a agregação dos conjuntos resultantes das contribuições das regras;
- Adoção de um grau (0 a 10), para avaliação dos parâmetros qualitativos: Suficiência e Conservação da Drenagem, Adequação da Cobertura Vegetal e Estabilidade do Solo.

5. ESTUDO DE CASO HIPOTÉTICO – DETERMINAÇÃO DO IP

A título de exemplo será apresentado um estudo de caso hipotético para um trecho rodoviário.

5.1. Cálculo do Estado de Conservação

- Grau para a Suficiência da Drenagem = 7 (avaliado por especialista).
- Grau para a Conservação da Drenagem = 4 (avaliado por especialista).
- Cond. Geral Via = Pista Rolamento e Acostamento c/ 10 % da área com degradações.

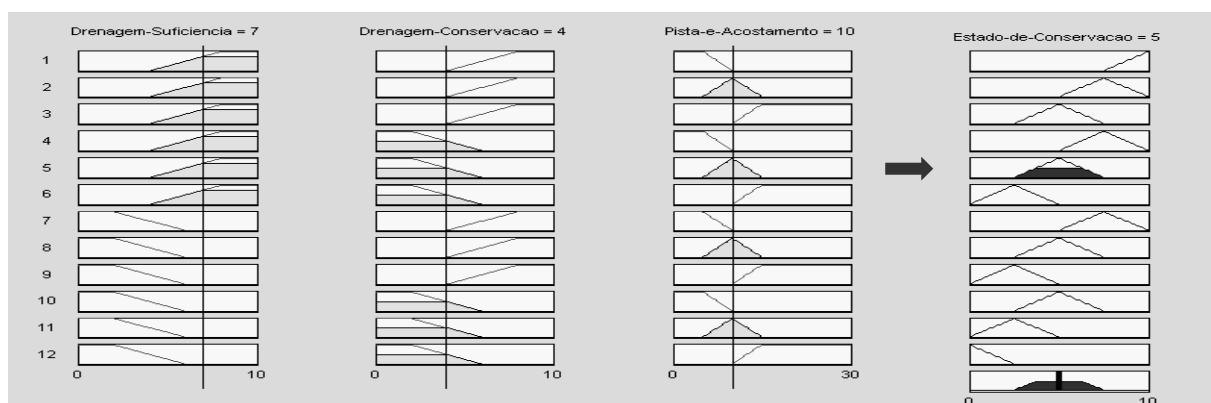


Figura 10: Sistema usando Inferência máx-mín (Mandani) – Saída: Estado de Conservação
A única regra ativada foi (Figura 10):

| | <i>Drenag_Sufic.</i> | <i>Drenag_Conserv.</i> | <i>Pista_e_Acostamento</i> | <i>Estado_Conserv.</i> |
|----|----------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| SE | (Suficiente) | E (Mal) | E (Regular) | ENTÃO (Regular) |
| | $\mu_1 = 0,75$ | $\mu_2 = 0,50$ | $\mu_3 = 1,00$ | $w(\text{Mín } \mu) = 0,50$ |

O resultado da defuzzificação pelo centróide apresentou: Estado de Conservação = 5. Para as inferências seguintes não será apresentada a figura correspondente à agregação das regras.

5.2 Cálculo do Índice Técnico - IT

- Estado de Conservação = 5.
- Volume Médio de Tráfego Diário = 2.500 veículos.

As regras ativadas foram:

| | <i>Estado_Conservação</i> | <i>VMD</i> | <i>Índice_Técnico</i> |
|----|---------------------------|-----------------|------------------------------|
| SE | (Regular) | E (Alto) | ENTÃO (Médio) |
| | $\mu_1 = 1,00$ | $\mu_2 = 0,435$ | $w(\text{Mín } \mu) = 0,435$ |
| SE | (Regular) | E (Muito Alto) | ENTÃO (Alto) |
| | $\mu_1 = 1,00$ | $\mu_2 = 0,687$ | $w(\text{Mín } \mu) = 0,687$ |

A defuzzificação pelo centro dos máximos é dada pela seguinte expressão (Figura 11):

$$IT = \frac{(0,435 \times 5,0) + (0,687 \times 7,5)}{(0,435 + 0,687)} = 6,53$$

O resultado da defuzzificação pelo centro dos máximos apresentou: Índice Técnico = 6,53

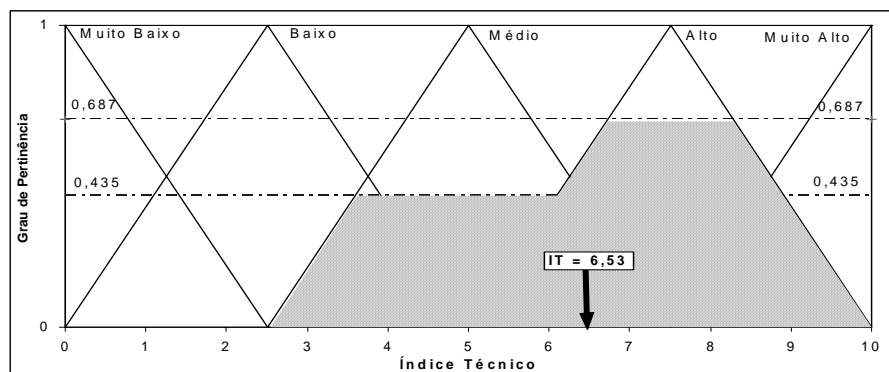


Figura 11: Defuzzificação pelo centro dos máximos para o Índice Técnico

5.3 Cálculo do Risco Geo-Ambiental

- Densidade da Cobertura Vegetal = 70 % (avaliado por especialista).
- Grau para a Adequação da Cobertura Vegetal = 8 (avaliado por especialista).
- Grau para a Estabilidade do Solo = 9 (avaliado por especialista).

As regras ativadas foram:

| | <i>Veget_Dens</i> | <i>Veget_Adeq</i> | <i>Tipo_e_Est_Solo</i> | <i>Risco_Geo-Ambiental</i> |
|----|-------------------|-------------------|------------------------|-----------------------------|
| SE | (Densa) | E (Adequada) | E (Estável) | ENTÃO (Muito Baixo) |
| | $\mu_1 = 0,20$ | $\mu_2 = 1,00$ | $\mu_3 = 1,00$ | $w(\text{Mín } \mu) = 0,20$ |
| SE | (Esparsa) | E (Adequada) | E (Estável) | ENTÃO (Baixo) |
| | $\mu_1 = 0,60$ | $\mu_2 = 1,00$ | $\mu_3 = 1,00$ | $w(\text{Mín } \mu) = 0,60$ |

O resultado da defuzzificação pelo centróide apresentou: Risco Geo-Ambiental = 0,974

5.4 Cálculo do Índice de Risco - IR

- Risco Geo-Ambiental = 0,974
- Risco Climático – precipitação média anual = 1.700 mm/ano

As regras ativadas foram:

| | <i>Risco_Geo_Ambiental</i> | | <i>Risco_Climático</i> | | <i>Índice_de_Risco</i> |
|----|----------------------------|---|------------------------|-------|-----------------------------|
| SE | (Baixo) | E | (Médio) | ENTÃO | (Baixo) |
| | $\mu_1 = 0,974$ | | $\mu_2 = 0,60$ | | $w(\text{Mín } \mu) = 0,60$ |
| SE | (Baixo) | E | (Alto) | ENTÃO | (Médio) |
| | $\mu_1 = 0,974$ | | $\mu_2 = 0,40$ | | $w(\text{Mín } \mu) = 0,40$ |

A defuzzificação pelo centro dos máximos é dada pela seguinte expressão (Figura 12):

$$IR = \frac{(0,600 \times 2,5) + (0,400 \times 5,0)}{(0,600 + 0,400)} = 3,50$$

O resultado da defuzzificação pelo centro dos máximos apresentou: Índice de Risco = 3,50

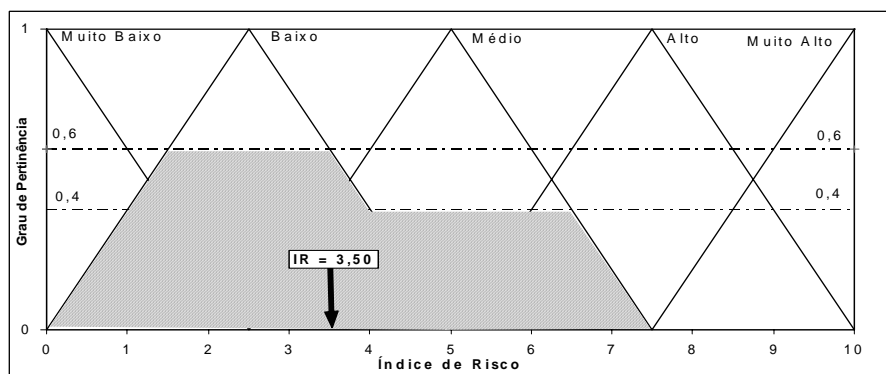


Figura 12: Defuzzificação pelo centro dos máximos para o Índice de Risco

5.5 Cálculo do Índice de Prioridade - IP

Para cálculo do Índice de Prioridade (IP) sugere-se a agregação dos Índices Técnico (IT) e de Risco (IR) pela união dos conjuntos fuzzy de saída destes últimos. O resultado da defuzzificação do conjunto união obtido será o Índice de Prioridade desejado. A defuzzificação da união dos conjuntos, pelo método do centro dos máximos, será dada pela seguinte expressão, conforme Figura 13:

$$IP = \frac{(0,600 \times 2,5) + (0,400 \times 5,0) + (0,435 \times 5,0) + (0,687 \times 7,5)}{(0,600 + 0,400 + 0,435 + 0,687)} = 5,10$$

A defuzzificação pelo centro dos máximos apresentou: Índice de Prioridade = 5,10

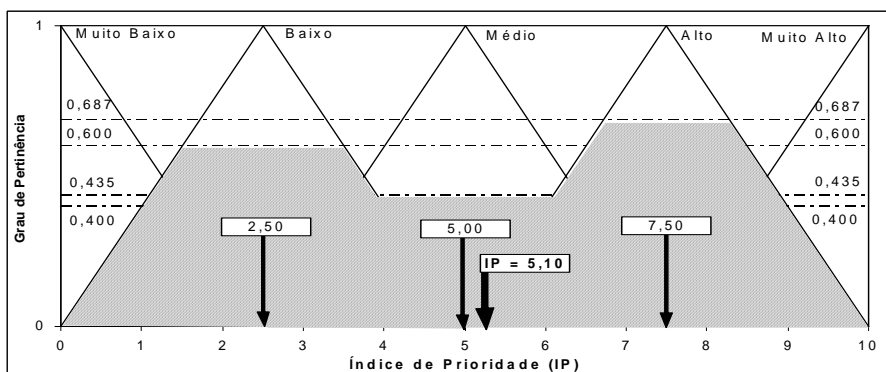


Figura 13: Defuzzificação pelo centro dos máximos para o Índice de Prioridade

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

No exemplo hipotético se observa que o Índice Técnico (6,53) é maior que o Índice de Risco (3,50), indicando que, para o trecho rodoviário analisado, características técnicas como estado de conservação da via e volume médio de tráfego são mais críticas do que as características geo-ambientais e climáticas, resultando em um Índice de Prioridade igual a 5,10.

Este trabalho mostrou como a teoria dos conjuntos fuzzy proposta por *Zadeh* em 1965, pode ser utilizada para hierarquizar segmentos rodoviários pavimentados tendo em vista a recuperação dos passivos ambientais existentes, demonstrando o potencial desta teoria para problemas que apresentem certo grau de incerteza e subjetividade. Como vantagens desta abordagem fuzzy podem ser destacadas:

- Os especialistas da área de engenharia rodoviária e de meio ambiente podem utilizar suas opiniões e experiências acumuladas para a geração das curvas de pertinência dos conjuntos fuzzy do problema, trazendo uma realidade maior para a avaliação dos parâmetros necessários para o cálculo dos índices.
- Nos conjuntos fuzzy as transições entre membros e não membros são gradativas. Variáveis quantitativas do problema, como condição geral da via (dado pelo percentual da área da pista e do acostamento com degradações), volume médio de tráfego diário e risco climático (dado pela precipitação média anual) são tratadas de maneira mais adequada quando a elas são associadas variáveis lingüísticas com curvas de pertinência adequadas.
- A escala proposta para o Índice de Prioridade varia continuamente de 0 a 10 sendo difícil a ocorrência de segmentos rodoviários com o mesmo valor de IP, devido às relações matemáticas fuzzy utilizadas e ao conceito de continuidade de alguns métodos de defuzzificação.

Uma desvantagem desta abordagem fuzzy quando comparada com a metodologia original é a necessidade da elaboração de rotinas de cálculo que incluam os passos apresentados, usando planilhas eletrônicas ou programas específicos.

Por fim, conclui-se que, além das características técnicas da rodovia, as características de interesse estratégico, sócio-econômico e de riscos ambientais (proximidade de áreas protegidas, de corpos hídricos e etc) são importantes no gerenciamento dos passivos ambientais, cuja abordagem também pode ser feita seguramente pela lógica fuzzy, constituindo-se em objeto potencial de futuros estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DNER (1996). *Manual Rodoviário de Conservação, Monitoramento e Controle Ambientais*, Rio de Janeiro.
- DNIT (2005). *Instruções de Proteção Ambiental das Faixas de Domínio e Lindeiras das Rodovias Federais*, Rio de Janeiro.
- Fogliatti, M. C., Filippo, S. e Goudard B. (2004). *Avaliação de Impactos Ambientais: Aplicação aos Sistemas de Transporte*. Ed. Interciência, Rio de Janeiro.
- Goudard, B. (2001). *Avaliação Ambiental de Alternativas de Projetos de Transporte Rodoviários com o Uso da Lógica Fuzzy*, Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- Ross, T. J. (1995). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Ed. McGraw-Hill, U.S.A.
- Shaw I. S. e Simões M. G. (1999). *Controle e Modelagem Fuzzy*. Ed. Edgard Blücher Ltda, FAPESP, São Paulo.

Silva, V. L. e Maia, A. D. G. (2004) Uma Contribuição ao Gerenciamento da Mobilidade: Modelo Integral-Fuzzy para Avaliação de Intervenções em Vias Urbanas. X SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção – UNESP, 2004.