

# *Estudo de modelos de verificação de sustentabilidade por meio de lógica fuzzy*

*Tatiane Tambarussi Thomaz*

Coordenação de Ciência da Computação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Santa Helena, Brasil  
tambarussi@utfpr.edu.br

*Volmir Eugênio Wilhelm*

Departamento de Engenharia de Produção  
Universidade Federal do Paraná  
Curitiba, Brasil  
volmir@ufpr.br

*Diego Venâncio Thomaz*

Departamento de Matemática e Estatística  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Medianeira, Brasil  
dvthomaz@utfpr.edu.br

**Resumo**—Estudos voltados à preservação do meio ambiente têm tido bastante destaque na atualidade. Este artigo apresenta uma breve descrição de trabalhos que vem sendo desenvolvidos com o uso de lógica fuzzy, ferramenta capaz de modelar sistemas complexos por possuir a característica de aproximar os modelos do raciocínio humano.

**Palavras-chave**—lógica fuzzy; sustentabilidade

## I. INTRODUÇÃO

Na atualidade os temas com maior evidência são os relacionados à sustentabilidade ambiental. Há muito tempo pode-se observar o crescente emprego da palavra sustentabilidade, a qual podemos atrelar o seu significado ao desenvolvimento econômico e social responsável. Apesar do uso da palavra sustentabilidade nas mais diversas áreas e âmbitos de estudo neste trabalho será focada na ligação ao desenvolvimento ecológico responsável e a preservação ambiental.

Em [1] já se descrevia a relação homem-meio ambiente por meio da natureza dos envolvidos; “o homem tem apenas um fim: escolher para vantagem de si próprio; a natureza, ao contrário, escolhe para vantagem do próprio ser”. Com base nesta afirmação é possível pensar em relações saudáveis entre homem e natureza? Qual é o equilíbrio? Muitas indagações podem ser feitas, mas quando há intervenção do homem, se faz necessário um estudo para colocar limites na exploração de recursos naturais, que desde tempos retrógrados são indispensáveis para a sobrevivência humana.

Em [7], afirma que há uma confusão entre o conceito de sustentabilidade e equilíbrio ecológico. Há uma falha em distinguir sustentabilidade ecológica, socioeconômica, e a relação necessária entre estes dois tipos de sustentabilidade; uma relação que define utilização sustentável nunca foi explorada. O fato é que não há limites

sobre a perda de biodiversidade aceitável, nem ponderações que diferentes consumidores têm diferentes interesses e necessidades.

O tema sustentabilidade é abordado em [2] colocando muitas situações em debate, conceituando sustentabilidade como a gestão de recursos de maneira que a sua contribuição para o bem-estar humano, seja conservado ou melhorado para as gerações seguintes. Apresentando como exemplo questões complicadas caracterizadas por ele de equidade transgeracional. Suponha que em algum momento  $t$ , o acesso médio per capita para algum recurso é adequado. No momento  $t + 1$ , o acesso médio per capita é aumentado. Como administrar recursos indispensáveis, como a água, de tal forma que a população mundial cresça e ao mesmo tempo o recurso não desapareça. Esse foi um dos temas discutidos na reunião anual da Associação Americana de Apoio a Ciência (AAAS) em 2007.

Nos últimos anos muitos autores vêm propondo modelos de verificação de sustentabilidade nos mais diferentes âmbitos, por exemplo sustentabilidade municipal, esse tipo de sustentabilidade pode ser avaliada em muitos aspectos, pois um município pode ser sustentável com relação a coleta seletiva de lixo, ao mesmo tempo que não é sustentável em respeito ao abastecimento de água. Uma teoria que tem auxiliado nesta avaliação é a lógica fuzzy.

Este trabalho tem por objetivo apresentar um modelo para auxiliar no contexto sustentabilidade, por meio da caracterização quantitativa de uma área com relação a vegetação baseado-se em bioindicadores, além de apresentar alguns modelos já existentes.

## II. LÓGICA FUZZY

A modelagem matemática tem uma característica muito interessante ao descrever processos que variam onde podem

ser usados métodos determinísticos ou estocásticos. Será determinístico se, retorna o mesmo resultado quando são usados o mesmo conjunto de dados. Os modelos estocásticos possuem caráter aleatório, as soluções dos modelos são obtidas quando se tem alguma distribuição estatística analisada. Segundo [13], para ponderar a variável na sua complexidade pode-se utilizar a teoria dos conjuntos *fuzzy*.

Por exemplo, é possível determinar o quanto uma pessoa gosta de chocolate apenas respondendo sim ou não? É possível, entretanto é evidente se for questionado em algum momento surgirá a resposta “mais ou menos”. E agora? Mais ou menos é sim? Ou não? Pois gostar de chocolates pode estar relacionado à frequência com que se consome o alimento, com a qualidade do produto e com a quantidade que se ingere. Sim ou não parece excluir muitos dados. Para melhor responder isso, pode-se analisar mais criteriosamente dimensionando um grau de pertinência dos mais variados consumidores. Se não consome chocolate seu grau de pertinência é zero, se comer 3 bombons por dia possui grau 1. Mas, e se a pessoa come um chocolate dia sim, dia não? Qual será seu grau de pertinência?

Para responder a esta pergunta surge a definição de conjuntos *fuzzy* ou conjuntos difusos. Na fundamentação da teoria dos conjuntos *fuzzy* reside a ideia de variáveis linguísticas, foi procurando atribuir significados a estes termos de cunho qualitativo e/ou subjetivo, como “perto”, “longe”, “alto”, “aproximadamente”, é que o matemático Lofti Zadeh, introduziu o conceito de conjuntos *fuzzy*. Como a lógica clássica, a lógica *fuzzy* se preocupa com a verdade das proposições. No entanto, no mundo real, as proposições são muitas vezes apenas parcialmente verdadeiras. A base da lógica *fuzzy* é permitir que os valores verdadeiros assumam qualquer valor no intervalo [0, 1].

De acordo com [4], um fator eminente dessa teoria é a capacidade de capturar conceitos intuitivos, além de considerar aspectos psicológicos utilizados pelos seres humanos em seu raciocínio usual, evitando que a representação seja engessada por modelos tradicionais.

Em [5] afirma-se que à medida que a complexidade de um sistema aumenta a habilidade humana de fazer afirmações precisas e objetivas, e que sejam significativas acerca deste sistema, diminui até que um limiar é atingindo além do qual, precisão e relevância tornam-se quase características mutuamente exclusivas.

A definição de lógica *fuzzy* como um conjunto de métodos baseados no conceito de conjuntos *fuzzy* as operações com esses conjuntos, possibilitam a modelagem realista e flexível de sistemas. Na referência [4] destaca-se que, apesar do nome, a lógica *fuzzy* não se trata de uma vertente da lógica matemática, nem uma nova teoria de conjuntos, e muito menos um paradigma conflitante com a teoria das probabilidades, mas uma teoria formulada por meio de conceitos da teoria dos conjuntos de cantor e se mostra como importante ferramenta no tratamento de sistemas estocásticos, aliada ao conhecimento já estabelecido nos modelos estatísticos.

A definição mais simples desta teoria é a de conjuntos *fuzzy*, onde cada elemento do conjunto está associado a um grau de pertinência, diferente da teoria de conjuntos clássica em que um elemento pertence ou não a um dado conjunto.

A definição é dada em [13] por:

**Definição:** Se  $X$  é uma coleção de objetos denotados genericamente por  $x$ , então um conjunto *fuzzy*,  $\tilde{A} \in X$  é um conjunto de pares ordenados:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X\} \quad (1)$$

em que  $\mu_{\tilde{A}}(x) \in [0,1]$  é denominada função de pertinência ou grau de pertinência (também grau de compatibilidade ou grau de verdade) de  $x$  em  $\tilde{A}$ . Quando  $\mu_{\tilde{A}} \in \{0,1\}$ ,  $\tilde{A}$  não é *fuzzy* e  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  é idêntica a função característica de um conjunto tradicional (não *fuzzy*).

O alcance dos elementos pertencentes aos conjuntos *fuzzy* permite uma modelagem que descreve termos como: muito, extremamente, bastante, pouco, razoável. De acordo com [6] a modelagem e o controle *fuzzy* são técnicas para se manusear informações qualitativas de uma maneira rigorosa. Tais técnicas consideram o modo como a falta de exatidão e a incerteza são descritas e, fazendo isso, tornam-se suficientemente poderosas para manipular de maneira conveniente o conhecimento. Sistemas baseados em regras *fuzzy* contêm quatro componentes descritos abaixo e apresentados na Fig.1:

- **Fuzzificação:** processador de entrada que realiza a construção dos conjuntos *fuzzy* e as funções de pertinência, as quais conforme o fenômeno a ser modelado necessitará de grande conhecimento específico, para ponderar características minuciosas da variável.
- **Base de regras:** é uma coleção de regras *fuzzy* na forma “Se... então...”. Cada uma destas regras ou proposições, pode ser descrita por meio de variáveis linguísticas.
- **Inferência fuzzy:** é neste componente que cada proposição *fuzzy* é traduzida matematicamente por meio das técnicas de raciocínio aproximado. Os operadores matemáticos serão selecionados para definir a relação *fuzzy* que modela a base de regras, nessa fase escolhe-se o método particular de Inferência *fuzzy*, pode-se citar o método de Mamdani e o Método de Takagi-Sugeno a diferença entre esses métodos pode ser simplificada pelo procedimento de defuzzificação.
- **Defuzzificação:** é o processo de se representar um conjunto *fuzzy* por um número real. Em sistemas *fuzzy*, em geral a saída é um conjunto *fuzzy*. Assim devemos escolher um método para defuzzificar a saída e obter um número real que a represente.

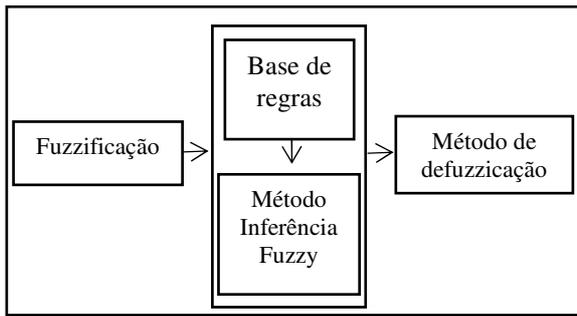


Fig.1: Sistemas baseados em regras fuzzy, adaptação de [7]

### III. CONTEXTUALIZAÇÃO DE MODELOS DE AVALIAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE QUE UTILIZAM-SE DE LÓGICA FUZZY

Existem muitas maneiras de se descrever um fenômeno natural com relação a sustentabilidade, como apresentado em [12] podem ser:

Modelos de visualização ilustrada que são modelos básicos usando diagramas de Venn, ou ilustrações.

Modelos quantitativos estes são mais informativos, exatos e poderosos para tomadores de decisões nesses tipos de modelos pode-se utilizar a teoria de lógica *fuzzy*.

Modelos físicos são baseados na criação ou recreação de vários ecossistemas.

Modelos conceituais estes são muito populares, por conter elementos que podem gerar um alerta com relação aos limites do ambiente natural.

Em [3] é proposto um modelo de Avaliação de Sustentabilidade por avaliação *Fuzzy* do inglês *Sustainability Assessment by Fuzzy Evaluation* (SAFE) verifica sustentabilidade combinando aspectos ecológicos (terra, água, ar e biodiversidade) e humano (econômico, social, educacional e político) esse mecanismo pode ser aplicado de maneira geral a diversas situações, entretanto no contexto sugerido pelo autor o modelo verifica desenvolvimento sustentável de países de forma global.

No trabalho [11], ao avaliar a sustentabilidade de ecossistemas por meio de um modelo baseado em lógica *fuzzy*, o autor afirma que esta teoria requer mais informações das variáveis envolvidas que em abordagens convencionais.

Em [10] apresentou-se o modelo que relaciona indicadores de sustentabilidade para avaliar desenvolvimento sustentável, usando a teoria de conjuntos *fuzzy*, com a finalidade de auxiliar na tomada de decisão.

No Parque do Rio Vermelho em Santa Catarina, o autor de [9], apresenta um modelo que avalia o grau de impacto de projetos desenvolvidos em unidades de conservação, com apoio de lógica *fuzzy*.

### IV. APLICAÇÃO

Para descrever sistemas com alta complexidade pode-se recorrer ao auxílio de conjuntos *fuzzy* que permitem com

auxílio de especialistas a modelagem de sistemas complexos. Quando trata-se de Unidades de Conservação (UC), muitas variáveis são importantes no dimensionamento de grau de sustentabilidade, entretanto no manual de elaboração de Plano de Manejo [14], documento que descreve com detalhes uma UC, consta que o menor grau de degradação de vegetação geralmente condiciona ao menor grau de degradação da fauna e dos solos. Ao contrário, quanto mais degradada estiver a vegetação de uma área, maiores interferências já teriam sofrido a fauna local e provavelmente também os solos. Baseados nesta instrução será considerada apenas a variável vegetação para ilustrar como um modelo baseado que se utilizada de lógica *fuzzy* pode descrever um sistema como uma UC com relação a conservação da natureza.

Vale ressaltar que há particularidades conforme se estuda um bioma como a caatinga e outro com a mata atlântica, no decorrer do trabalho vamos falar sobre concentração de vegetação, neste caso estaremos nos referindo ao quanto esta área possui de mata fechada e clareiras.

#### 1º Passo: Fuzzyficação

Nesta etapa ocorre a criação dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de entradas (*inputs*) e saídas (*output*) considerando a hipótese de trabalho que é verificar níveis de preservação em uma UC com base na vegetação. Serão usadas variáveis de entrada que refletem a concentração de vegetação em uma determinada área e a diversidade de espécie nesta mesma área. As funções de pertinência grafada na Fig.2 refere-se à variável de entrada “Concentração de Vegetação”. Nestes gráficos, pode-se identificar, no eixo horizontal, os valores, [0,10], remetendo a uma avaliação quantitativa, em níveis de 0 a 10.

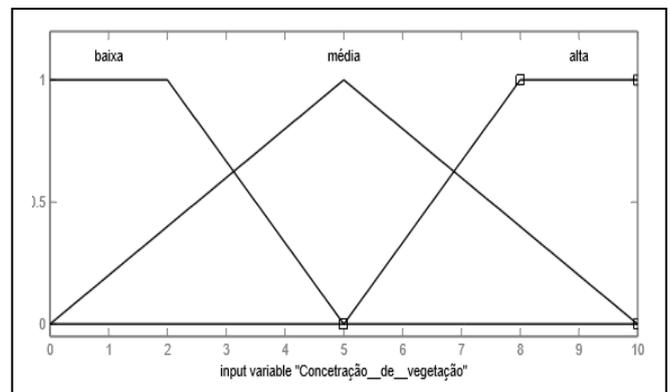


Fig. 2: Variável de entrada “Concentração de Vegetação”

Considerando três valores linguísticos ou termos linguísticos: baixa, média e alta. Para o termo linguístico baixa a seguinte função de pertinência, conhecida como trapezoidal é

$$f(x,a,b,c,d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (2)$$

Na Fig. 2 pode-se observar a forma de trapézio para o termo linguístico baixa e alta com os valores  $f(x,0,0,2,5)$  e  $f(x,5,8,10,10)$  em (2) respectivamente. Ao termo linguístico média, a função de pertinência escolhida foi a triangular.

$$f(x,a,b,c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (3)$$

Os valores associados à função de pertinência do termo linguístico média foram  $f(x,0,5,10)$ . O mesmo raciocínio pode ser empregado na variável de entrada “Diversidade de Espécie” com os termos linguísticos pouca, média e alta onde pouca e alta são termos que possuem função de pertinência trapezoidal com  $f(x,0,0,2,3)$  e  $f(x,7,8,10,10)$  respectivamente, e média tem função de pertinência triangular com os seguintes parâmetros  $f(x,1,5,9)$ , como pode ser visto na Fig. 3:

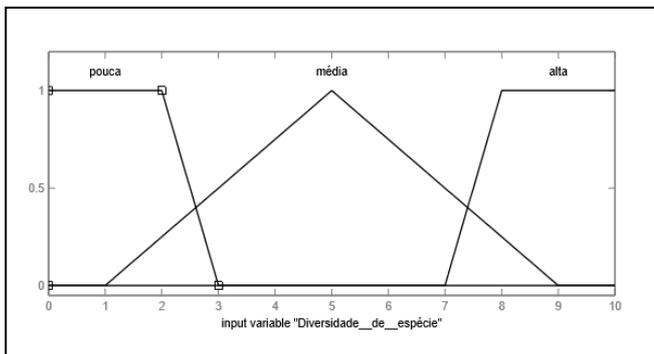


Fig.3: Variável de entrada “Diversidade de Espécie”

Na formulação dos conjuntos pode-se apresentar o conjunto das variáveis de saída, na Fig.4, denominado “Característica da área com relação a preservação da vegetação”, com os seguintes termos linguísticos: muito baixa, baixa, média, alta, muito alta.

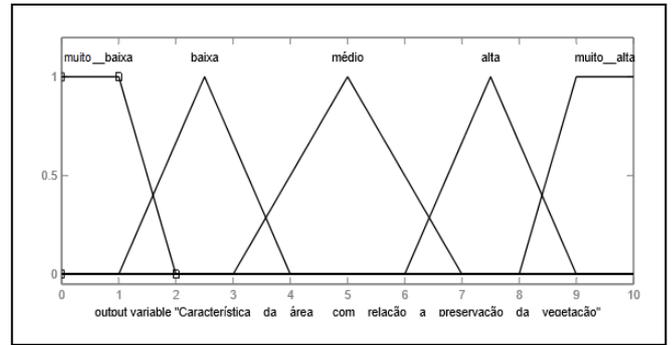


Fig. 4: Variável de saída “Característica da área com relação a preservação da vegetação”

O intervalo de 0 a 10 é avaliação associada à preservação de determinada área considerando conservação da vegetação no aspecto concentração e diversidade.

### 2º Passo: Base de Regras

Como os conjuntos de entrada são apenas dois, baseados em consultas a especialistas formulou-se 9 regras de decisão.

1. Se “Concentração da vegetação” é baixa e “Diversidade de espécie” é pouca então “Característica da área com relação a preservação da vegetação” é muito baixa.
2. Se “Concentração da vegetação” é baixa e “Diversidade de espécie” é média então “Característica da área com relação a preservação da vegetação” é baixa.
- ...
9. Se “Concentração da vegetação” é alta e “Diversidade de espécie” é alta então “Característica da área com relação a preservação da vegetação” é muito alta.

### 3º Passo: Inferência Fuzzy

Neste passo cada proposição *fuzzy* é traduzida matematicamente por meio dos operadores (mínimo, máximo entre outros) escolhidos de acordo com o método de defuzzificação aplicado. Os operadores matemáticos serão selecionados para definir a relação *fuzzy* que modela a base de regras, nessa fase escolhe-se o método particular de Inferência *fuzzy*, pode-se citar o método de Mamdani e o Método de Takagi-Sugeno. No exemplo descrito, considerou-se apenas regras com o operador lógico “e” que geralmente é associado ao operador matemático “mínimo”. Para agregar os resultados/consequentes de cada regra é usado o operador “máximo”.

### 4º Passo: Defuzzificação

Nesta etapa acontece a transformação de variáveis *fuzzy* para valores reais/crisp, ou seja, a transformação da variável linguística para forma numérica. Para isto existem diferentes métodos e o escolhido foi o método do cálculo do centróide dado por:

$$z^* = \frac{\int \mu_z z dz}{\int \mu_z dz} \quad (3)$$

onde  $z^*$  é a saída sobre o sistema de regras *fuzzy*.

## V. RESULTADOS

Com o sistema *fuzzy* criado pode-se simular alguns valores de entrada e observar qual a saída. Sejam entradas 2 e 3, ou seja, observou-se uma concentração de vegetação em nível 2 e diversidade de espécie em nível 3, obtendo a saída “característica da área com relação a preservação da vegetação” igual a 3,85 ( $z^* = 3,85$ ).

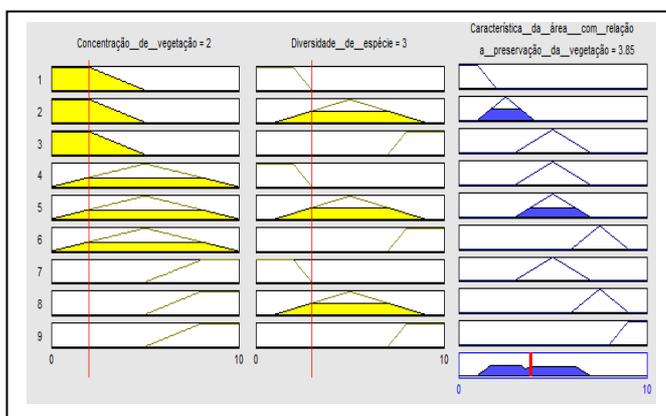


Fig.5: Resultado obtido pelo método Mamdani com entradas 2 e 3.

As marcações vermelhas (linhas verticais) na Fig.5 mostram quais são os conjuntos que as entradas 2 e 3 se enquadram aplicando o operador mínimo devido a natureza da formulação das regras.

TABELA 1: RESULTADOS

Resultados	Valores de entradas		
	Valor para entrada 1	Valor para entrada 2	Valor de Saída
Situação 1	2	3	3,85
Situação 2	4	8	5,67
Situação 3	7	5	6,09
Situação 4	1	4	3,34
Situação 5	10	3	7,5

Na Tabela 1, os valores referentes a entrada 1 são atribuídos a variável de entrada “Concentração de vegetação” e entrada 2 a variável “Diversidade de espécie”, obtendo como resultado o valor de saída apresentado na última coluna que seria a implicação das entradas aplicadas nas regras de inferência pelo método de Mandami.

Na situação 5 mesmo que a unidade de conservação tenha mata fechada ou seja índice máximo de concentração de vegetação, como ela tem uma pequena diversidade de

espécies, sua caracterização em termos quantitativos de 0 a 10 é 7,5.

## VI. CONCLUSÕES

Pode-se observar que este tipo de sistema possui fácil interpretação, pois as variáveis de entrada no contexto de verificação de sustentabilidade, seria a descrição atual da área analisada em termos de vegetação, a variável de saída torna conhecido após combinar as entradas como essa área se encontra atualmente. Esse tipo de sistema pode auxiliar tomadores de decisões a prever situações de risco, possibilitando a inclusão de mais variáveis de entradas de acordo com o estudo a ser realizado ou com o que se pretende verificar especificamente.

## REFERÊNCIAS

- [1] DARWIN, Charles. A Origem das Espécies, no meio da seleção natural ou a luta pela existência na natureza. vol.1, tradução do doutor Mesquita Paul. São Paulo: 1859.
- [2] KENNEDY, D. Sustainability. Science, 2007 feb, vol.315 n.5812, p.573-573.
- [3] ANDRIANTIATSAHOLINIAINA L.A., KOUKOGLOU V.S., PHILLIS Y.A. Evaluating strategies for sustainable development: fuzzy logic reasoning and sensitivity analysis, Revista Ecological Economics, 48, 2004, pp. 149-172.
- [4] OLIVEIRA JR, Hime Aguiar. Lógica Difusa: Aspectos práticos e aplicações. Rio de Janeiro: Interciência, 1999.
- [5] WEBER, Leo; KLEIN, Pedro Antonio Trierweiler. Aplicação da Lógica Fuzzy em Software e Hardware. Canoas: Ed. Ulbra, 2003.
- [6] GOMIDE, F. A. C. ; GUDWIN, R. R. ; TANSCHKEIT, R. . Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy e Aplicações. In: 6th International Fuzzy Systems Association World Congress - IFSA'95, 1995, São Paulo, SP, Brasil, 1995.
- [7] BARROS, L. C. et al. Introdução à lógica fuzzy. Campinas: UNICAMP/IMECC, 2006. 65p. Material de auxílio didático.
- [8] ROBINSON, J.G. The limits to caring: sustainable living and the loss of biodiversity. Conservation Biology. New York. 1992.
- [9] CAMPOS FILHO, Pio. Método para apoio à decisão na verificação da sustentabilidade de uma unidade de conservação, usando lógica fuzzy. Florianópolis: UFSC, 2004. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- [10] CORNELISSEN, A. M. G. et al. Assessment of the contribution of sustainability indicators to sustainable development: a novel approach using fuzzy set theory. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2001, v. 86, p. 173-185.
- [11] PRATO, T. A fuzzy logic approach for evaluating ecosystem sustainability. Ecological Modelling, 2005 feb , v.187, pp.361-368.
- [12] TODOROV, V; MARINOVA, D. Modelling sustainability. Mathematics and Computers in Simulation 81 (2011) 1397-1408.
- [13] ZIMMERMANN, H. J., Fuzzy Set Theory and Applications, Kluwer Academic Publishers, Boston, U.S.A., 1991.
- [14] ICMBio, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Roteiro Metodológico para Elaboração de Planos de Manejo para Florestas Nacionais, Brasília: ICMbio, 2009.
- [15] ZADEH, L. A., Fuzzy Sets. Information and Control, vol. 8 p.338-353, 1965.