

## Uma abordagem *fuzzy* no zoneamento de risco de incêndio

Matheus Pinheiro Ferreira<sup>1</sup>

Letícia Koproski<sup>2</sup>

Daniel Capella Zanotta<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{mpf, zanotta}@dsr.inpe.br

<sup>2</sup> Laboratório de Incêndios Florestais, UFPR, Curitiba – PR, Brasil  
leticia@koproski.com

**Abstract.** Risk maps are valuable tools because they provide a visualization of the spatial distribution of fire risk. There are several techniques for modeling the fire hazard in natural environments. Recently, methods based on fuzzy sets theory have been successfully incorporated into decision support mechanisms. In this context, the aim of this work is to develop a fuzzy fire risk map for the Cerrado State Park in Jaguariaíva located in the state of Parana/Brazil. Through the Analytic Hierarchy Process (AHP) were generated weights for the variables of the fire hazard equation. The fuzzyfication of this variables were done before they could being integrated to generate the fuzzy fire risk map. The use of AHP technique combined with fuzzyfication was satisfactory to the spatial assessment of risk. The risk map showed no rigid boundaries between classes, providing a better visualization and precision of the spatial distribution of risk.

**Palavras-chave:** risk map, AHP, fuzzyfication, risco de incêndio, AHP, transformação *fuzzy*

### 1. Introdução

Os incêndios são ameaças constantes às unidades de conservação. Nesses locais, os prejuízos causados pelo fogo podem ser incalculáveis do ponto de vista ecológico, conservacionista, social e até mesmo financeiro, já que essas áreas são responsáveis pela conservação de amostras ecologicamente sustentáveis dos ecossistemas (Oliveira et al., 2000). Sendo assim, é necessário o estabelecimento de métodos que forneçam subsídios para o planejamento e estabelecimento de atividades de prevenção, pré-supressão e controle de incêndios em áreas protegidas.

Nesse contexto, os zoneamentos de risco são ferramentas valiosas, pois proporcionam uma visualização da distribuição espacial do risco de incêndio em toda a área protegida (Oliveira, 2002), identificando as regiões com maiores e menores probabilidades de ocorrência de incêndios (Vetorazzi e Ferraz, 1998).

O zoneamento de risco de incêndios é gerado pela manipulação algébrica dos mapas de risco, em função da somatória ponderada dos riscos parciais de cada variável previamente analisada (Batista, 2000; Oliveira et al., 2004). Diversos modelos de integração têm sido utilizados para a elaboração de zoneamentos de risco de incêndios (Chuvieco e Congalton, 1989; Castañeda, 1997; Ferraz e Vettorazzi, 1998; Freire et al., 2002). Para Oliveira (2002), o melhor modelo de ponderação é aquele definido de acordo com as condições de ocorrência dos incêndios locais e que considera a importância de cada variável em função das características da área de estudo. O balanceamento das variáveis não é trivial e pode interferir fortemente na obtenção do produto final.

Existem várias técnicas de modelagem do risco de incêndio em ambientes naturais, desde modelos matemáticos puros (baseados em equações determinísticas) a técnicas de inteligência computacional. Os modelos mais eficientes incluem informações em um contexto espacial e integram técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (SIGs) (Bonazountas et al., 2005). Juntamente a isso,

mecanismos de suporte a decisão baseados em análises multicritério vem sendo utilizados na quantificação do risco de incêndio, uma técnica renomada é o Processo Analítico Hierárquico (AHP). Recentemente, métodos baseados na teoria de conjuntos *fuzzy* têm sido incorporados em tais mecanismos com sucesso (Kahraman et al., 2003).

O processo de tomada de decisão é geralmente realizado em um ambiente não determinístico onde a relação entre as variáveis nem sempre é exata existindo, portanto, algum grau de incerteza e subjetividade (Tso e Mather, 2009). Conjuntos *fuzzy* eliminam fronteiras rígidas que separam as classes em um conjunto booleano clássico, proporcionando uma transição entre as mesmas, através da variação de graus de pertinência atribuídos aos pixels da imagem. A abordagem *fuzzy* certamente proporciona uma melhor flexibilização da classificação de risco, uma vez que o risco é em sua natureza incerto. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho é gerar um mapa *fuzzy* de zoneamento de risco de incêndio para o Parque Estadual do Cerrado, localizado em Jaguariaíva no Estado do Paraná.

## 2. Metodologia

### 2.1 Área de estudo

O Parque Estadual do Cerrado representa o limite meridional de distribuição geográfica do ecossistema cerrado (Straube et al., 2005). O Parque possui área total de 430 hectares e está localizado na mesorregião centro oriental do Paraná, município de Jaguariaíva. As coordenadas centrais aproximadas no sistema de projeção cartográfica Transversa Universal de Mercator (UTM) e Datum SAD-69 Zona 22 Sul, são: 7325927 m e 635701 m (Figura 1). A região em que o Parque está inserido recebe influências tanto do clima subtropical úmido mesotérmico (Cfa), quanto do clima temperado propriamente dito (Cfb), e a altitude média é de 810 m. Como o próprio nome da unidade sugere, ele situa-se em área de vegetação clássica de Cerrado, representado por suas distintas fitofisionomias.

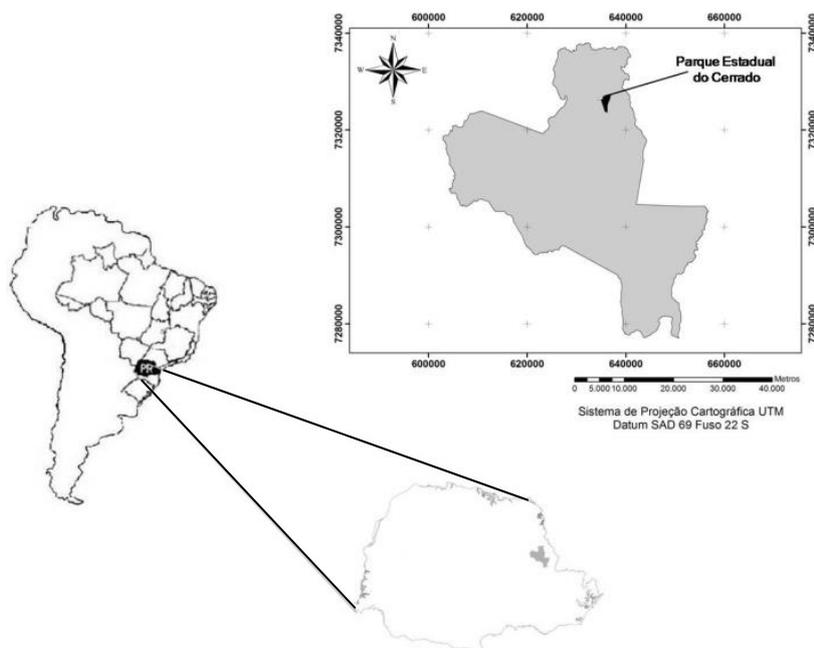


Figura 1. Localização do Parque Estadual do Cerrado.

## 2.2 Processo Analítico Hierárquico (AHP) e equação de risco de incêndio

O Processo Analítico Hierárquico (AHP) foi desenvolvido na década de 1970 por Thomas L. Saaty. O método tem como objetivo facilitar a incorporação de considerações qualitativas e subjetivas dentro de fatores quantitativos para o processo de tomada de decisão. Esta técnica procura hierarquizar as variáveis por meio de comparações paritárias e é utilizado para determinar a importância relativa de cada uma na decisão final (Saaty, 2000). O AHP é uma teoria com base matemática que permite organizar e avaliar a importância relativa entre critérios e medir a consistência de julgamentos. Essa importância é baseada em comparações pareadas que utilizam o bom senso e o conhecimento dos usuários sobre o tema. Ao final do processo, são gerados pesos que expressam a contribuição de cada variável para se atingir o objetivo final.

O grau de risco de incêndio é determinado pela correlação entre diversas variáveis ambientais que quando associadas criam condições que dificultam o controle do fogo. Essas variáveis podem ser combinadas por equações que traduzem o potencial de ocorrência e a propagação do fogo. Nesse trabalho, o modelo de integração de dados foi expresso pela equação adaptada de Koproski (2010):

$$\text{RISCO} = 0,534\mathbf{V} + 0,291\mathbf{E} + 0,08\mathbf{D} + 0,04\mathbf{S} \quad (1)$$

Onde:

V = Vegetação (NDVI)

E = Distância das estradas

D = Declividade

S = Orientação das vertentes ou exposição

Por meio da técnica AHP foram gerados pesos para cada variável e a razão de consistência obtida foi de 0,087, que se enquadra no referencial sugerido pela literatura (Saaty, 1994). É importante salientar que a vegetação é a variável que mais influencia o grau de risco (maior peso), pois representa o combustível a ser consumido e sem combustível, não há fogo.

## 2.4 Geração das variáveis da equação de risco de incêndio

As variáveis da equação de risco foram obtidas com o auxílio do *software* SPRING versão 4.3.3. As imagens correspondentes as variáveis da equação foram geradas com pixels de dimensão 15x15 metros, tornando-se assim compatível com a resolução espacial do sensor orbital utilizado neste trabalho.

### 2.4.1 Vegetação

Para obtenção da variável vegetação foi utilizado o produto L2-AST07 do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), a bordo do satélite EOS-Terra, que contém dados do instrumento VNIR (visível e infravermelho próximo: 0,52 - 0,86  $\mu\text{m}$ ) e SWIR (infravermelho de ondas curtas: 1,60 - 2,43  $\mu\text{m}$ ) corrigidos para o efeito da atmosfera e convertidos em superfície de reflectância (Abrams e Hook, 2002). A cena utilizada foi adquirida no dia 02 de novembro de 2010. A caracterização da cobertura vegetal da área de estudo foi realizada por meio do cálculo do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) (Rouse et al., 1973). Fatiando-se a imagem NDVI em classes de mesma amplitude dentro de seu intervalo de variação [0, 0.7059], foi possível perceber a existência de três classes bem definidas: [0, 0.1941], [0.1941, 0.3647] e [0.3647, 0.7059]. Ao se analisar o mapa de vegetação da área, constatou-se que estas classes estavam associadas a certas fitofisionomias. Desta

maneira, inferiu-se que a tonalidade mais clara de NDVI (0.3647 a 0.7059) representa uma unidade fitofisionômica de floresta típica denominada de floresta ecotonal, a classe intermediária (0.1941 a 0.3647) ao cerrado *sunsu-stricto* com predominância de espécies arbóreo-arbustivas e a classe inicial (0 a 0.1941) ao campo sujo que é uma fitofisionomia composta predominantemente por gramíneas.

A Figura 2 mostra em (a) a composição R3 G2 B1 da imagem ASTER, cuja combinação corresponde às regiões do infravermelho próximo (0.76 - 0.86  $\mu\text{m}$ ), vermelho (0.63 - 0.69  $\mu\text{m}$ ) e verde (0.52 - 0.60  $\mu\text{m}$ ), em (b) têm-se a imagem NDVI.

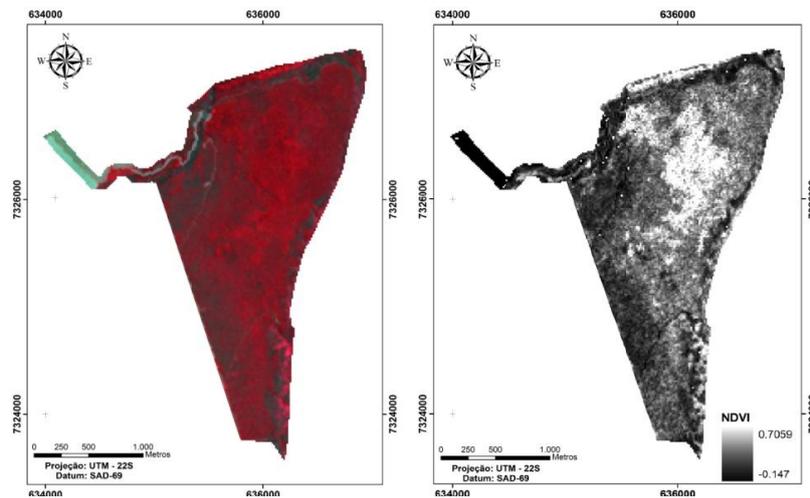


Figura 2. (a) Composição colorida ASTER/Terra R3G2B1, (b) Imagem NDVI.

#### 2.4.1 Distância de estradas, declividade e orientação das vertentes

A variável distância de estradas foi obtida a partir da elaboração de um mapa de distância onde foram considerados apenas os pixels distantes no máximo 50 metros da estrada conforme a Figura 3 (a). Obteve-se a imagem declividade por meio do Modelo Digital do Terreno (MDT) modelado a partir das curvas de nível com equidistância de 10 metros. A Figura 3 (b) mostra a imagem declividade em que o valor máximo foi de 58 graus. Assim como a declividade, a orientação das vertentes foi obtida a partir do MDT, a Figura 3 (c) mostra a imagem desta variável e seus pixels possuem valores no intervalo e 0 a 360 graus.

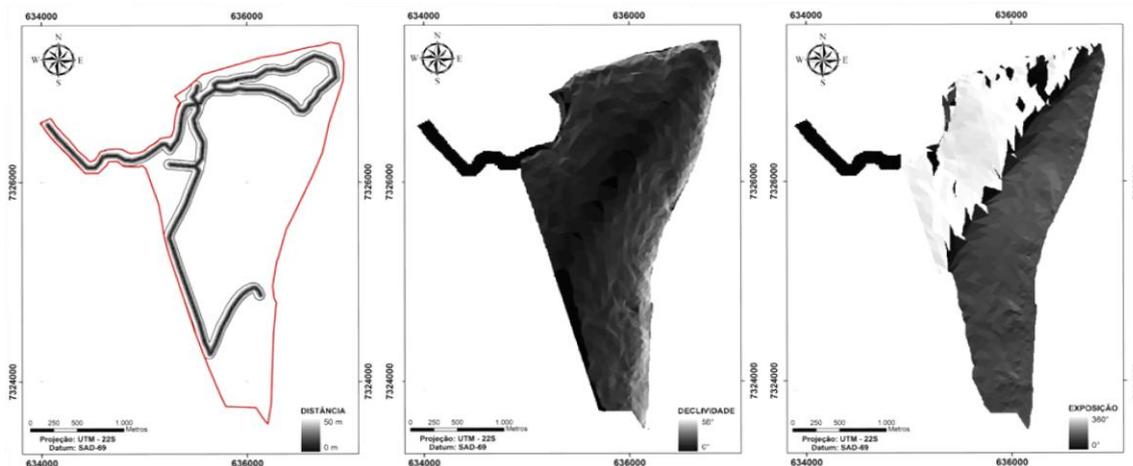


Figura 3. (a) Mapa de estradas, (b) Mapa de declividade, (c) Mapa de orientação das vertentes.

### 2.5 Transformação *fuzzy* das variáveis da equação de risco de incêndio

Um conjunto *fuzzy* é basicamente uma metodologia de caracterização de classes que não define limites rígidos (bordas) entre as mesmas. Um conjunto *fuzzy*  $F$  definido em um universo contínuo  $U$  é caracterizado por uma função  $\mu_F(x)$  que transcreve um elemento no universo contínuo  $U$  a um grau de pertinência correspondente que é um número real do intervalo  $[0, 1]$  (Bellman e Zadeh, 1970). Sendo assim, para se realizar a transformação *fuzzy* das variáveis é preciso primeiramente definir a função de transferência que irá atribuir os graus de pertinência aos pixels de entrada. Segundo Tso e Mather (2009) as funções de transferência mais comuns são: triangular, trapezoidal e em forma de sino. A escolha da forma desta função é particular para cada variável, sendo subjetiva e depende do problema. Analisando o comportamento de cada variável ao longo do seu intervalo de variação foram estabelecidas distintas funções de transferência triangulares, mostradas na Figura 4 a seguir:

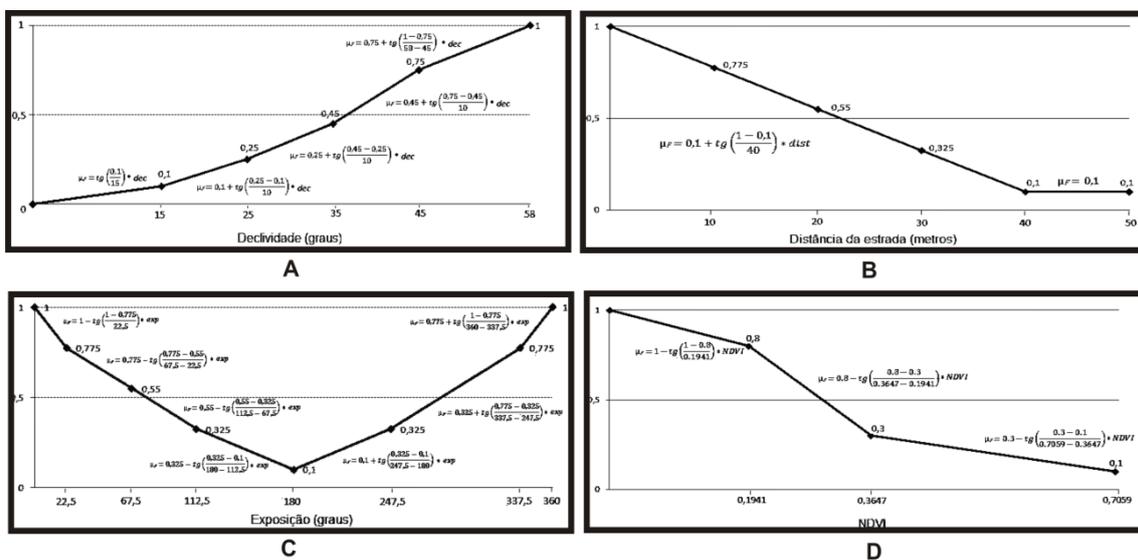


Figura 4. Funções de transferência das variáveis da equação de risco de incêndio. Em (A) Declividade, (B) Distância da estrada, (C) Orientação das vertentes e (D) NDVI.

Nota-se na Figura 4 que as retas que definem as funções de transferência possuem diferentes inclinações. Por exemplo, na Figura 4 (B) referente à distância da estrada, o coeficiente angular da reta é constante até quarenta metros indicando que até este ponto a variação no grau de pertinência do pixel é uniforme. Esta forma não se mantém nas retas das funções de transferência das outras variáveis. Na Figura 4 (D) percebe-se que a inclinação da reta muda na medida em que o NDVI aumenta, sugerindo que o grau de pertinência do pixel a ser classificado varia de acordo o intervalo de NDVI previamente definido. A escolha do ângulo de inclinação das retas em cada função de transferência foi empiricamente baseada no conhecimento da área e da contribuição de cada variável e intervalo de variação da mesma no grau de risco de incêndio. A Figura 5 mostra os mapas *fuzzy* de cada variável da equação de risco.

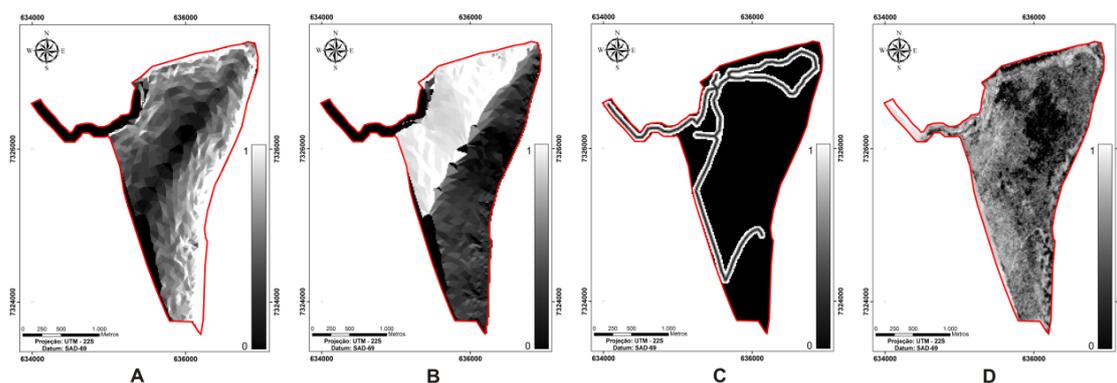


Figura 5. Mapas *fuzzy* das variáveis da equação de risco de incêndios. Em (A) mapa *fuzzy* de declividade, em (B) mapa *fuzzy* de exposição, em (C) mapa *fuzzy* de estradas e em (D) mapa *fuzzy* de vegetação.

Após a obtenção das imagens *fuzzy*, as mesmas foram combinadas por meio da equação (1). Nesta equação o valor de cada pixel da imagem *fuzzy* correspondente a uma determinada variável (declividade, orientação das encostas, distância da estrada e vegetação) foi multiplicado por seu respectivo coeficiente. Os valores dos pixels das imagens foram então somados para se obter a imagem correspondente ao risco de incêndio.

### 3. Resultados e Discussão

A Figura 6 apresenta o mapa *fuzzy* de risco de incêndio gerado pela metodologia empregada neste trabalho. O resultado da Equação (1) gerou uma imagem cujos pixels variam de 0 a 0,9, sendo o grau de risco de incêndio máximo em 0,9. Este valor foi atingido nas estradas do parque onde há grande circulação de pessoas associada à cobertura vegetal propícia a ocorrência de incêndios (baixo NDVI). As fitofisionomias associadas à formação vegetacional de cerrado, foram classificadas como sendo de risco mais elevado do que as demais fitofisionomias encontradas no Parque. Áreas consideradas de alto risco são representadas com coloração alaranjada e estão associadas a formações de cerrado com alta vulnerabilidade ao fogo devido à presença de gramíneas e sua maior inflamabilidade. Percebe-se também áreas de alto risco na porção oeste do parque, nestes locais a declividade é muito elevada e faz com que a propagação de um eventual incêndio seja mais rápida, aumentando o risco. Isso porque, a inclinação determina as condições de pré-aquecimento do material combustível e afeta a taxa de propagação do fogo. Na medida em que o fogo se propaga, a temperatura do ar aumenta, pré-aquece os combustíveis à frente da linha de fogo, e dessa forma facilita seu avanço com maior velocidade nos aclives. Pixels com grau de pertinência variando entre 0,3 e 0,4 representam áreas onde o risco de incêndios é moderado. Estas regiões estão localizadas em formações de cerrado *sensu-stricto*. Na parte central do Parque ocorre uma unidade fitofisionômica de floresta, denominada de floresta ecotonal. Esta região foi classificada como de baixo risco, uma vez que este tipo de cobertura vegetal determina um microclima característico onde a temperatura é mais amena, a umidade é mais elevada e o vento não circula livremente.

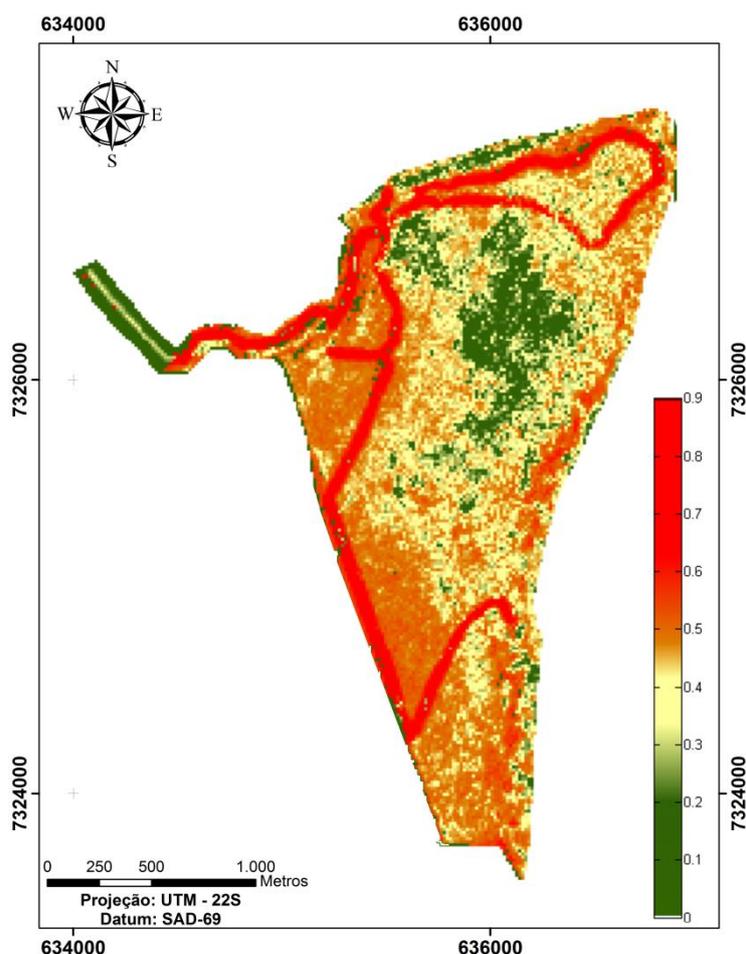


Figura 6. Mapa *fuzzy* de risco de incêndio

#### 4. Conclusões

A metodologia de zoneamento de risco de incêndio proposta neste trabalho foi capaz de identificar áreas prioritárias para o manejo do fogo. A transformação *fuzzy* das variáveis da equação de risco de incêndio proporcionou a elaboração de um mapa de zoneamento sem fronteiras rígidas entre as classes. Desta forma, foi possível uma melhor visualização da distribuição espacial do risco. A utilização da técnica AHP aliada à transformação *fuzzy* foi satisfatória para a avaliação espacial do risco. Além disso, o modelo de integração utilizado traduziu adequadamente os níveis de riscos obtidos para o Parque Estadual do Cerrado, pois considerou a importância de cada variável em função das características da área de estudo.

#### Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq pela concessão de bolsa de mestrado ao primeiro autor, a CAPES pela concessão de bolsa de doutorado ao terceiro autor.

#### Referências Bibliográficas

Abrams, M.; Hook, S. **ASTER user handbook**. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, 2002.

Batista, A. C. Mapas de risco: uma alternativa para o planejamento de controle de incêndios florestais. **Floresta**, Curitiba, v. 30, n. 1/2, p. 45-54, 2000.

Bellman, R. E.; Zadeh, L. A. Decision making in a fuzzy environment. **Management Science**, v. 17, p. 141–164, 1970.

Bonazountas, M.; Kallidromitou, D.; Kassomenos, P. A., & Passas, N. Fire risk analysis. **Human and Ecological Risk Assessment**, v. 11, p. 617–626, 2005.

Castañeda, A. Zonificación para el manejo de incendios en plantaciones forestales en Colombia. **Boletín de Protección Forestal**, Colombia, n. 2, p. 38-46, 1997.

Chuvieco, E.; Congalton, R.G. Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. **Remote Sensing of Environment**, v. 29, p. 147-159, 1989.

Ferraz, S. F. B.; Vettorazzi, C. A. Mapeamento de risco de incêndios florestais por meio de sistema de informações geográficas (SIG). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 53, p. 39-48, 1998.

Freire, S.; Carrão, H.; Caetano, M. **Produção de cartografia de risco de incêndio florestal com recurso a imagens de satélite e dados auxiliares**. Lisboa: IGP, 2002.

Kahraman, C.; Ruan, D.; Dogan, I. Fuzzy group decision-making for facility location selection. **Information Sciences**, v. 157, p. 135–153, 2003.

Koproski, L. P. **Risco de incêndio e suas correlações com a diversidade biológica no Parque Estadual do Cerrado (Paraná, Brasil)**. 2010. 226 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2010.

Oliveira, D. S. **Zoneamento de risco de incêndios em povoamentos florestais no norte de Santa Catarina**. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

Oliveira, D. S.; Batista, A. C.; Soares, R. V.; Grodzki, L.; Vosgerau, J. Zoneamento de risco de incêndios florestais para o Estado do Paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 2, p. 217-221, 2004.

Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Third ERTS Symposium, **Proceedings NASA SP-351**, NASA, Washington, DC, v. 1, p. 309-317, 1973.

Saaty, T. L. **Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process**. Pittsburgh: RWS Publications, 2000.

Saaty, T. L. Highlights and critical points in the theory and application of the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 74, p. 426–447, 1994.

Straube, F. C.; Urben-Filho, A.; Gatto, C. A avifauna do Parque Estadual do Cerrado (Jaguariaíva, Paraná) e a conservação do cerrado em seu limite meridional de ocorrência. **Atualidades Ornitológicas**, Ivaiporã, v. 127, p. 29-29, 2005.

Tso, B.; Mather, P. M. **Classification Methods for Remotely Sensed Data**, New York: Taylor & Francis Group, 2009. 155 p.

Vettorazzi, C. A.; Ferraz, S. F. B. Uso de sistemas de informações geográficas aplicados à prevenção e combate a incêndios em fragmentos florestais. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 12, n. 32, p. 111-115, 1998.