

ALFREDO DA COSTA PEREIRA JÚNIOR

**MÉTODOS DE GEOPROCESSAMENTO NA AVALIAÇÃO
DA SUSCEPTIBILIDADE DO CERRADO AO FOGO**

**SÃO CARLOS
NOVEMBRO 2002**

ALFREDO DA COSTA PEREIRA JÚNIOR

**MÉTODOS DE GEOPROCESSAMENTO NA AVALIAÇÃO DA
SUSCEPTIBILIDADE DO CERRADO AO FOGO**

Tese Submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais – PPG-ERN da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar para aprovação no grau de Doutor em Ciências da Área de Concentração em Ecologia e Recursos Naturais

Orientador: Dr. José Eduardo dos Santos – PPG-ERN
Co-orientador: Dr. Alberto Waingort Setzer – INPE

**SÃO CARLOS
NOVEMBRO 2002**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

P436mg

Pereira Júnior, Alfredo da Costa.

Métodos de geoprocessamento na avaliação da
susceptibilidade do Cerrado ao fogo / Alfredo da Costa
Pereira Júnior . -- São Carlos : UFSCar, 2003.
97 p.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos,
2002.

1. Ecologia. 2. Cerrados. 3. Queimadas em cerrado. 4.
AVHRR/NOAA. 5. Meteorologia. 6. Malha viária. I. Título.

CDD: 574.5 (20a)

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. José Eduardo dos Santos do PPG-ERN/UFSCar, pela orientação, companheirismo, apoio e incentivo.

Ao Dr. Alberto Setzer do INPE, pela co-orientação.

À Dra. Helena França, pelo apoio, incentivo, sugestões, discussões e revisões.

Aos amigos da UFSCar, Adriana Pires, Ana Lícia Feliciano, Cássio Figueira, Carlos Henke-Oliveira (Bixo), Flávia Moura, Flávia Munin, Judith Batalla, Maria Rejane Lima, Paulo Sérgio Maroti (TO), Suely Costa. Em especial a Adriana Paese, Ana Maria Teixeira, Fernanda Maria Néri, José Salatiel Pires e Maria Inês Nahas.

Aos funcionários do PPG-ERN/UFSCar, do LAPA e da Estação Ecológica do Jataí.

Aos amigos do INPE, Carlos Felgueiras, Camilo Rennó, Dalton Valeriano, Eymar Lopes (Jaburu), João Pedro Cordeiro, Luis Maurano, Maycira Costa, Ricardo Cartaxo Sousa. Em especial a José Eduardo Mantovani.

Ao José Miguel Pereira do Tropical Research Institute de Portugal e Adélia Sousa da Universidade de Évora de Portugal.

Aos meus familiares, que sempre incentivaram meu trabalho. Em especial para a Alfredo, Alzira, Marcia, Marcos, Paulo, Iara, Marlene, Tomaz.

Às instituições que viabilizaram a realização deste trabalho: PPG-ERN/UFSCar e INPE, pelo apoio financeiro e logístico; CNPq pelo apoio financeiro através de bolsa de doutorado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE SIGLAS E UNIDADES.....	ix
RESUMO	x
ABSTRACT.....	xi
APRESENTAÇÃO.....	xii
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 - Domínio do Cerrado	1
1.2 - Biodiversidade e ‘Hotspots’	4
1.3 - Fogo na Vegetação do Cerrado – Causas e Efeitos	6
1.4 - Condições para Ocorrência de Fogo na Vegetação do Cerrado	7
1.5 - Índices de Susceptibilidade ao Fogo	10
1.6 - Objetivos.....	11
1.7 - Materiais e Método - Resumo	12
1.7.1 - Área de estudo	12
1.7.2 - Materiais	12
1.7.3 - Método.....	16
1.7.3.1 - Incorporação dos dados ao SIG.....	16
1.7.3.2 - Geração de grades numéricas regulares e mapas de classes.....	16
1.7.3.3 - Sobreposição dos focos de queimadas com as grades e mapas.....	17
Referências.....	20
2 - SUSCEPTIBILIDADE DA VEGETAÇÃO DO CERRADO AO FOGO EM RELAÇÃO ÀS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS	25
Resumo.....	25
2.1 - Introdução.....	25
2.2 - Objetivo	27
2.3 - Materiais e Método.....	28
2.3.1 - Área de estudo	28
2.3.2 - Materiais	30
2.3.3 - Método.....	30
2.3.3.1 - Processamento dos dados meteorológicos.....	30
2.3.3.2 - Processamento dos focos de queimadas	31
2.3.3.3 - Sobreposição e análise dos dados.....	31
2.4 - Resultados e Discussão.....	34
2.4.1 - Interpolações.....	34
2.4.2 - Condições meteorológicas na ocorrência de queimadas	34
2.5 - Conclusões.....	44
Referências.....	45

3 - CLASSIFICAÇÃO DA VEGETAÇÃO DO CERRADO QUANTO À SUSCEPTIBILIDADE AO FOGO COM O USO DE IMAGENS AVHRR/NOAA	49
Resumo.....	49
3.1 - Introdução.....	49
3.2 - Objetivo	52
3.3 - Materiais e Método.....	52
3.3.1 - Área de estudo	52
3.3.2 - Materiais	54
3.3.4 - Método.....	56
3.3.4.1 – Fundamentação teórica	56
3.3.4.2 - Geração dos mapas de susceptibilidade ao fogo	57
3.3.4.3 - Sobreposição dos mapas de susceptibilidade ao fogo com os focos de queimadas ...	57
3.3 - Resultados e Discussão.....	58
3.3.1 - Algoritmo para geração dos mapas de susceptibilidade ao fogo.....	58
3.3.2 - Análise espaço-temporal dos mapas de susceptibilidade ao fogo	59
3.3.3 - Sobreposição dos mapas de susceptibilidade ao fogo com os focos de queimadas	67
3.4 - Conclusões.....	69
Referências.....	70
4 - SUSCEPTIBILIDADE DA VEGETAÇÃO DO CERRADO AO FOGO EM RELAÇÃO À DISTÂNCIA DA MALHA VIÁRIA E DE FOCOS DE QUEIMADAS	74
Resumo.....	74
4.1- Introdução.....	74
4.2 - Objetivo	76
4.3 - Materiais e Método.....	77
4.3.1 - Área de estudo	77
4.3.2 - Materiais	78
4.3.3 - Método.....	79
4.3.3.1 - Processamento dos dados de malha viária.....	79
4.3.3.2 - Processamento dos dados de focos de queimadas	80
4.3.3.3 – Sobreposição dos focos de queimadas atuais com os mapas de distância.....	81
4.4 - Resultados e Discussão.....	84
4.4.1 – Geração dos mapas de distância.....	84
4.4.2 - Sobreposição dos mapas de distância com os focos atuais	88
4.5 - Conclusões.....	92
Referências.....	93
5 - CONCLUSÕES	96

LISTA DE FIGURAS

	p.
Figura 1.1 – Domínios Morfoclimáticos e Fitogeográficos do Brasil, com o Cerrado em posição central em relação aos outros Domínios.....	01
Figura 1.2 – Fitofisionomias do Cerrado <i>lato sensu</i>	02
Figura 1.3 – Precipitação anual média do Cerrado.....	03
Figura 1.4 – Área de estudo com extensão de 2.200.000 km ²	13
Figura 1.5 – Limite do Cerrado com os seguintes dados: focos de queimadas de 21/ago/1998, estações meteorológicas e malha viária.....	15
Figura 1.6 – Limite do Cerrado sobreposto ao mosaico de Índice de Vegetação gerado de imagens do sensor orbital AVHRR/NOAA-14 do período de maio a outubro/1998.....	15
Figura 1.7 – Exemplo de grade numérica regular com dados de umidade relativa do ar às 18h00 GMT do dia 21/agosto/1998: a) sobre o Cerrado; b) detalhe sobre a área do Cerrado do estado de São Paulo.....	18
Figura 1.8 – Detalhe do mapa de classes gerado com base na grade regular de distância da malha viária e da sobreposição com focos de queimadas de 21/agosto/1998. Região centrada em 12°45'S / 49°15'O.....	19
Figura 1.9 – Detalhe do mapa de classes gerado com base na grade regular de distância dos focos de 20/agosto/1998 e da sobreposição com os focos de 21/agosto/1998. Região centrada em 12°45'S / 49°15'O.....	19
Figura 2.1 – Área de estudo com extensão de 2.200.000 km ² , com as estações meteorológicas.....	29
Figura 2.2 – Detalhe sobre a área do Cerrado no estado de São Paulo da: a) grade numérica regular da umidade relativa do ar às 18h GMT do dia 21/agosto/1998, junto com os dados das estações meteorológicas que deram origem à grade; b) grade numérica regular do número de focos de queimadas do dia 21/agosto/1998, junto com os focos; c) sobreposição das duas grades permitindo estimar as condições meteorológicas das células com e sem focos de queimadas	33
Figura 2.3 – Número e porcentagem acumulada de células do Cerrado: a) com focos de queimadas, em um total de 2.914 células; b) sem focos de queimadas, em um total de 17.558 células, para o parâmetro meteorológico precipitação diária. Foram analisadas 20.472 células no Cerrado no período de maio a outubro /1998.....	39
Figura 2.4 – Número e porcentagem acumulada de células do Cerrado: a) com focos de queimadas, em um total de 2.914 células; b) sem focos de queimadas, em um total de 17.558 células, para o parâmetro meteorológico precipitação acumulada de 5 dias. Foram analisadas 20.472 células no Cerrado no período de maio a outubro /1998.....	40
Figura 2.5 – Número e porcentagem acumulada de células do Cerrado: a) com focos de queimadas, em um total de 2.914 células; b) sem focos de queimadas, em um total de 17.558 células, para o parâmetro meteorológico umidade relativa do ar às 18h GMT. Foram analisadas 20.472 células no Cerrado no período de maio a outubro /1998.....	41
Figura 2.6 – Número e porcentagem acumulada de células do Cerrado: a) com focos de queimadas, em um total de 2.914 células; b) sem focos de queimadas, em um total de 17.558 células, para o parâmetro meteorológico temperatura do ar às 18h GMT. Foram analisadas 20.472 células no Cerrado no período de maio a outubro /1998.....	42
Figura 2.7 – Número e porcentagem acumulada de células do Cerrado: a) com focos de queimadas, em um total de 2.914 células; b) sem focos de queimadas, em um total de 17.558 células, para o parâmetro meteorológico dias consecutivos sem chuva. Foram analisadas 20.472 células no Cerrado no período de maio a outubro /1998.....	43
Figura 3.1 – Área de estudo com extensão de 2.200.000 km ²	53
Figura 3.2 – Mosaicos de imagens AVHRR/NOAA-14 da América do Sul com o limite da área de estudo: a) Canal 3, 1ª quinzena de maio/1998; b) IVDN, 1ª quinzena de maio/98; c) máximo IVDN, maio/1998 a abril/99.....	55

Figura 3.3– Mapa de susceptibilidade ao fogo do Cerrado da 1ª quinzena de maio/1998 com os focos de queimadas de 22/maio/1998. Neste período ocorreu a maior área da classe <i>Cerrado-Verde</i> com 1.019 mil km ² , correspondendo a 48% do Cerrado. A classe <i>Cultura</i> também tem sua maior área neste período com 140 mil km ² , correspondendo a 7% do Cerrado.....	60
Figura 3.4– Mapa de susceptibilidade ao fogo do Cerrado da 1ª quinzena de julho/1998 com os focos de queimadas de 29/julho/1998. Neste período, a classe <i>Cerrado-Marrom</i> atingiu a sua maior área com cerca de 1.678 mil km ² , correspondendo a 78% da área de estudo. A soma das classes <i>Cerrado-Amarelo</i> e <i>Cerrado-Marrom</i> ocupa 1.742 mil km ² , correspondente a 81% da área de estudo, estando no período entre a 2ª quinzena de junho e 1ª quinzena de agosto quando esta soma alcançou suas maiores áreas.....	61
Figura 3.5– Mapa de susceptibilidade do Cerrado ao fogo da 2ª quinzena de agosto/1998 com os focos de queimadas de 12/setembro/1998. A classe <i>Queimada</i> apresentou sua maior área nesta quinzena com 202 mil km ² , correspondendo a 9% da área de estudo. A classe <i>Cerrado-Amarelo</i> ocupou 588 mil km ² , correspondendo a 27% da área de estudo, valor similar aos 28% da quinzena seguinte quando esta classe alcançou sua maior área. A classe <i>Cerrado-Verde</i> ocupou 36 mil km ² nesta quinzena, correspondendo a 2% da área de estudo, estando no período entre a 1ª quinzena de agosto e a 1ª quinzena de outubro quando esta classe atingiu suas menores áreas.....	62
Figura 3.6– Mapa de susceptibilidade do Cerrado ao fogo da 2ª quinzena de outubro/1998. A classe <i>Queimada-anterior</i> alcançou sua maior área nesta quinzena com 681 mil km ² , correspondendo a 32% da área de estudo. A classe <i>Queimada-anterior</i> junto com a <i>Queimada</i> atingiram 714 mil km ² , correspondendo a 33% da área de estudo.....	63
Figura 3.7– Área percentual das classes de susceptibilidade ao fogo por quinzena no período de maio a outubro/1998, em relação à área do Cerrado de 2.200.000 km ²	65
Figura 3.8– Porcentagem de focos de queimadas por classe de susceptibilidade ao fogo do Cerrado em 24 dias no período de maio a outubro/1998	67
Figura 4.1– Área de estudo com extensão de 2.200.000 km ² , com a malha viária principal do Cerrado.....	78
Figura 4.2– Detalhe da grade numérica regular de distância, com resolução de 2,5 km, gerada da malha viária. Os valores indicam a menor distância em metros de um ponto da grade até a malha viária. Região centrada em 12°45'S / 49°15'O.....	79
Figura 4.3– Detalhe do mapa de classes de distância da malha viária sobreposto pela grade de distância que o gerou. Região centrada em 12°45'S / 49°15'O.....	80
Figura 4.4– Detalhe da grade numérica regular de distância, com resolução de 2,5 km, gerada com base nos focos de queimada do dia 20/agosto/1998. Os valores indicam a distância em metros de um ponto da grade até o foco de queimada mais próximo. Região centrada em 12°45'S / 49°15'O.....	82
Figura 4.5– Detalhe do mapa de classes de distância dos focos do dia 20/agosto/1998 sobreposto pela grade de distância que o gerou. Região centrada em 12°45'S / 49°15'O.....	82
Figura 4.6– Detalhe da sobreposição entre os focos de queimadas atuais (21/agosto/1998) e o mapa de classes de distância da malha viária. Região centrada em 12°45'S / 49°15'O.....	83
Figura 4.7– Detalhe da sobreposição entre os focos de queimadas atuais (21/agosto/1998) e o mapa de classes de distância dos focos de queimadas da véspera (20/agosto/1998). Região centrada em 12°45'S / 49°15'O.....	83
Figura 4.8– Mapa de classes de distância da malha viária junto com os focos de queimadas atuais (21/agosto/1998), no Cerrado.....	85
Figura 4.9– Mapa de classes de distância dos focos de queimadas da véspera (20/agosto/1998) junto com focos de queimadas atuais (21/agosto/1998), no Cerrado.....	86
Figura 4.10 – Número percentual acumulado de focos de queimadas atuais por distância da malha viária e por distância dos focos de queimadas da véspera, no período de maio a outubro/1998.....	91
Figura 4.11 – Porcentagem acumulada da incidência dos focos de queimadas atuais e área por classe de distância da malha viária e por classe de distância dos focos de queimadas da véspera, no período de maio a outubro/1998.....	91

LISTA DE TABELAS

	p.
Tabela 1.1 – Número total e endêmico de espécies do Cerrado.....	4
Tabela 1.2 – Datas selecionadas com dados de focos de queimadas no período de maio a outubro/1998.....	16
Tabela 2.1 – Células do Cerrado que satisfazem simultaneamente as condições meteorológicas mínimas propícias às queimadas, no período de maio a outubro/1998.....	35
Tabela 2.2 – Células do Cerrado com focos de queimadas que satisfazem simultaneamente as condições meteorológicas mínimas propícias às queimadas, no período de maio a outubro/1998.....	35
Tabela 2.3 – Células do Cerrado sem focos de queimadas que satisfazem simultaneamente as condições meteorológicas mínimas propícias às queimadas, no período de maio-outubro/1998.....	36
Tabela 2.4 – Valores médios mensais para os parâmetros meteorológicos, nas células do Cerrado com e sem focos de queimadas, no período de maio a outubro/1998.....	36
Tabela 2.5 – Precipitação diária para as células do Cerrado com e sem focos de queimadas, no período de maio a outubro/1998.....	39
Tabela 2.6 – Precipitação acumulada de 5 dias para as células do Cerrado com e sem focos de queimadas, no período de maio a outubro/1998.....	40
Tabela 2.7 – Umidade relativa do ar às 18h GMT para as células do Cerrado com e sem focos de queimadas, no período de maio a outubro/1998.....	41
Tabela 2.8 – Temperatura do ar às 18h GMT para as células do Cerrado com e sem focos de queimadas, no período de maio a outubro/1998.....	42
Tabela 2.9 – Dias consecutivos sem chuva para as células do Cerrado com e sem focos de queimadas, no período de maio a outubro/1998.....	43
Tabela 2.10 – Resultado da aplicação do teste U de Mann-Whitney para os dados meteorológicos mensais do conjunto de células do Cerrado com e sem focos de queimadas, no período de maio a outubro/1998.....	44
Tabela 3.1 – Critérios do algoritmo para gerar os mapas quinzenais de susceptibilidade ao fogo.....	58
Tabela 3.2 – Área percentual e número de focos de queimadas por classe de susceptibilidade ao fogo do Cerrado, de maio a outubro/ 1998.....	64
Tabela 4.1 – Dias selecionadas com focos atuais e com focos da véspera, no período de maio a outubro/1998.....	81
Tabela 4.2 – Áreas ocupadas no Cerrado pelas classes de distância da malha viária.....	87
Tabela 4.3 – Áreas médias ocupadas no Cerrado pelas classes de distância dos focos de queimadas da véspera.....	87
Tabela 4.4 – Incidência dos focos de queimadas atuais para as classes de distância da malha viária, no período de maio a outubro/1998.....	90
Tabela 4.5 – Incidência dos focos de queimadas atuais para as classes de distância dos focos de queimadas da véspera, no período de maio a outubro/1998.....	90

LISTA DE SIGLAS E UNIDADES

SIGLAS:

AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer
CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DSA – Divisão de Satélites Ambientais
GMT – Greenwich Mean Time
IAF – Índice de Área Foliar
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IV – Índice de Vegetação
IVDN – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
LAPA – Laboratório de Análise e Planejamento Ambiental
ND – Número Digital
NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration
MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
PCD – Plataforma de Coleta de Dados
PPG-ERN – Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais
SIG – Sistema de Informações Geográficas
SPRING – Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
UFSCar – Universidade Federal de São Carlos

UNIDADES:

°C - graus Celsius
μm - micrômetro
mm - milímetro
km - quilômetro

RESUMO

Anualmente, o Cerrado é queimado em 20 a 30% de sua área durante a estação seca, principalmente devido a causas antrópicas. Três fatores simultâneos são necessários para que as queimadas ocorram: condições meteorológicas propícias; disponibilidade de combustível vegetal; existência de fonte de ignição. Este trabalho estudou a susceptibilidade da vegetação do Cerrado ao fogo em relação a parâmetros desses três fatores: precipitação, umidade relativa e temperatura do ar, em relação às condições meteorológicas; classes de cobertura vegetal, em relação ao combustível vegetal; proximidade de malha viária e de focos de queimadas dos dias anteriores, em relação à fonte de ignição. Como verdade de campo foram utilizados os dados de localização dos focos de queimadas obtidos de imagens do canal 3 (3,7 μm) do 'Advanced Very High Resolution Radiometer / National Oceanic and Atmospheric Administration' - 12 (AVHRR/NOAA-12). O período de estudo foi de maio a outubro/1998. A área de estudo foi dividida em células de 50 km por 50 km. As condições meteorológicas em 95% das células com queimadas foram: precipitação inferior a 2 mm; precipitação acumulada de 5 dias inferior a 25 mm; umidade relativa do ar inferior a 60%; temperatura do ar superior a 28°C; mais de um dia sem chuva antecedendo a queimada. Mais de 80% do Cerrado estavam susceptível a ocorrência de fogo, com os locais com e sem focos de queimadas apresentando as condições meteorológicas mínimas propícias à combustão da vegetação relatadas na literatura: precipitação inferior a 5 mm; precipitação acumulada de 5 dias inferior a 20 mm; umidade relativa do ar inferior a 60%; temperatura do ar superior a 25°C. Um método para classificar a cobertura vegetal do Cerrado quanto à susceptibilidade ao fogo também foi desenvolvido, baseado em mosaicos quinzenais do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) e do canal 3 gerados com base em imagens AVHRR/NOAA-14. Sete classes de cobertura vegetal foram discriminadas, as quais foram associadas a quatro graus de susceptibilidade: muito baixo, baixo, médio e alto. Foi verificado que 72% dos focos de queimadas ocorreram nas classes de susceptibilidade alta e média, indicando resultados satisfatórios no desenvolvimento preliminar desse método. Por último, foi analisada a distância entre focos de queimadas e dois indicadores de atividade antrópica: malha viária e focos de queimadas recentemente ocorridos. Cerca de um quarto dos focos de queimadas ocorreram até 10 km da malha viária, em uma área ao longo das vias de 582 mil km^2 , cerca de 27% da área total do Cerrado. Do mesmo modo, um quarto dos focos ocorreu até 10 km dos focos de queimadas ocorridos no dia anterior, em uma área média no entorno dos focos de 33 mil km^2 , cerca de 2% do Cerrado. Portanto, a proximidade de indicadores de atividade antrópicas pode ser um bom instrumento para avaliação da susceptibilidade da vegetação ao fogo.

Palavras-chave: Cerrado; queimada; fogo; AVHRR/NOAA; parâmetros meteorológicos; malha viária.

ABSTRACT

At the present, the Cerrado (a type of the Brazilian savannas) is burned on about 20 to 30% of its area during the dry season mainly owing to anthropic causes. Three simultaneous factors are needed for the burnings to happen: favourable meteorological conditions; availability of vegetation fuel; existence of an ignition source. This work studied the susceptibility of the Cerrado vegetation to fire with respect to parameters linked to the three factors: rainfall, relative air humidity and air temperature with respect to the meteorological conditions; vegetation coverage classes with respect to the biomass fuel; proximity to the roads and fire spots from previous days with respect to the ignition source. Location data for the fire spots obtained from the AVHRR/NOAA-12 channel 3 (3,7 μm) images were used as field truth. The study period was between May and October 1998. The study area was divided into 50 km x 50 km cells. The meteorological conditions occurring in 95% of the cells presents fire spots were: rainfall lower than 2 mm; 5-day cumulative precipitation lower than 25 mm; relative air humidity lower than 60%; air temperature higher than 28°C; more than one rainless day before the burning. More than 80% of the Cerrado were susceptible to the fire occurrence, with both locations with and without fire spots presented the minimum meteorological conditions favourable to the vegetation burning described in the literature: rainfall lower than 5 mm; 5-day cumulative precipitation lower than 20 mm; relative air humidity lower than 60%; air temperature higher than 25°C; A method for classifying the Cerrado vegetation coverage to fire susceptibility was also developed. This method was based on 2-weekly mosaics of the AVHRR/NOAA-14 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and of the channel3 images. Seven classes of vegetation coverage were discriminated and associated to four degrees of susceptibility: very low, low, medium and high. It was verified that 72% of the burning occurred in the high and medium susceptibility classes, which indicated satisfactory results on the preliminary development of this method. Lastly, the distance between the fire spots and two indicators of anthropic activity was analysed. The indicators were: roads and fire spots previously occurred. About a quarter of the fire spots occurred at up to 10 km from the roads in a area of 582,000 km² surrounding the roads, which is about 27% of the Cerrado's total area. On the same way, a quarter of the spots occurred at up to 10 km from the fire spots of the previous day, in an average area of 33,000 km² at the burning spots surroundings. This area is about 2% of the total area of the Cerrado. In conclusion, the indicators of anthropic activity analysed here area good tools for studying the vegetation susceptibility to fire.

Key words: Cerrado; savanna; burning; fire; AVHRR/NOAA; meteorology parameters; roads.

APRESENTAÇÃO

O Cerrado é o segundo maior domínio do Brasil em tamanho, após a Amazônia, e o segundo mais degradado, após a Mata Atlântica, mas tem recebido pouca atenção quando comparada àquela dedicada a esses outros dois domínios. O Cerrado foi incluído na lista dos 25 ‘hotspots’ mundiais de biodiversidade pelo alto grau de endemismo de suas espécies e pelo avançado estado de degradação em que se encontra.

O fogo é um evento natural do Cerrado, mas na atualidade é intensamente utilizado em atividades antrópicas ligadas às práticas agropecuárias, sendo estimado que de 20 a 30% do Cerrado são queimados anualmente. Esta elevada incidência de queimadas tem sido relacionada com efeitos prejudiciais ao ambiente, tais como: redução da biodiversidade; empobrecimento do solo pela perda de nutrientes; erosão do solo pela sua maior exposição à chuva; poluição no âmbito local; mudanças climáticas regionais e globais. Por outro lado, a completa supressão do fogo também acarreta efeitos ambientais no Cerrado, com alteração na composição florística e fisionômica da vegetação e conseqüente redução de biodiversidade.

Apesar de diversos trabalhos terem sido realizados com relação ao fogo no Cerrado, ainda existem controvérsias quanto a sua utilização em práticas agropecuárias e no manejo de áreas de conservação. O atual plano de manejo de supressão total do fogo, adotado em áreas de conservação do Cerrado, tem sido pouco discutido com base em fundamentos científicos. Em relação às práticas agropecuárias, muitas vezes o fator ambiental é deixado de lado em detrimento dos fatores sócio-econômicos, com tendência de se considerar o fogo como um ‘mal necessário’, pois essa prática apresenta baixo custo quando comparado com outras técnicas de limpeza de áreas agropecuárias e de manejo de pastagens.

Este trabalho procura contribuir com a conservação do Cerrado ao estudar a susceptibilidade da vegetação ao fogo e sua relação com os fatores essenciais para ocorrência de queimadas: condições meteorológicas propícias, disponibilidade de combustível vegetal e existência de fonte de ignição. Em âmbito regional, a susceptibilidade ao fogo pode ser utilizada no manejo da vegetação do Cerrado, tanto de áreas de conservação quanto nas de atividades agropecuárias. Uma vez conhecido o grau de susceptibilidade ao fogo numa região, podem ser emitidos alertas para as áreas onde ele é maior, para que sejam intensificadas as medidas preventivas. Por outro lado, nas áreas de menor susceptibilidade pode ser autorizado o uso do fogo controlado.

Este documento foi estruturado na forma de artigos como uma forma de diminuir o tempo entre o término da tese e a publicação dos resultados em revistas científicas. Este

formato fez com que o trabalho apresentasse passagens redundantes, já que a área de estudo, por exemplo, é a mesma em todo trabalho e foi descrita em cada artigo. Da mesma forma, parte do método também é comum a todos eles. Por outro lado, os capítulos podem ser lidos de forma independente, sem prejuízo da sua compreensão.

O Capítulo 1 é uma introdução geral, com uma descrição do Domínio do Cerrado e de problemas relacionados a sua conservação. Também se discute a ocorrência do fogo na vegetação, suas implicações ambientais, bem como as condições necessárias para sua ocorrência. São também apresentados alguns dos índices de susceptibilidade ao fogo. Finalmente, são expostos os objetivos do trabalho, bem como uma descrição sucinta dos materiais e métodos utilizados. Os três capítulos seguintes são os artigos propriamente ditos, sendo cada um relacionado a um dos fatores necessários para ocorrência de queimadas.

O Capítulo 2 mostra as condições meteorológicas de ocorrência de combustão em vegetação e a relação com sua susceptibilidade ao fogo.

O Capítulo 3 apresenta um método para classificação da cobertura vegetal quanto à sua susceptibilidade ao fogo por meio de imagens do AVHRR/NOAA.

O Capítulo 4 é um estudo sobre a proximidade de dois indicadores de atividades antrópicas — malha viária e queimadas recentemente ocorridas — e suas relações com a ocorrência de queimadas, visto que a ação humana é a principal fonte de ignição.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões gerais do trabalho.

1 – INTRODUÇÃO

1.1 - Domínio do Cerrado

A extensa região central do Brasil correspondente ao Domínio do Cerrado (Figura 1.1) apresenta características morfoclimáticas e fitogeográficas similares, ocupa mais de 2 milhões de km², espalhados por 12 estados, equivalente a um quarto do território brasileiro (COUTINHO, 2000).



Figura 1.1 – Domínios Morfoclimáticos e Fitogeográficos do Brasil, com o Cerrado em posição central em relação aos outros domínios.
Fonte: COUTINHO (2000).

A vegetação natural do Domínio do Cerrado apresenta fitofisionomias que englobam formações florestais, savânicas e campestres. No aspecto fitofisionômico as formações florestais representam áreas com predominância de espécies arbóreas com a presença de um dossel contínuo. As fitofisionomias florestais que ocorrem no Domínio do Cerrado são: Cerradão, Mata Seca, Mata Ciliar e Mata de Galeria. As formações savânicas referem-se às áreas com árvores e arbustos dispersos sobre um estrato graminoso sem a formação de um dossel contínuo. As fitofisionomias savânicas do Domínio do Cerrado são: Cerrado *stricto sensu*, Campo Cerrado, Vereda e Palmeiral. As formações campestres designam as áreas com predominância de espécies herbáceas e algumas arbustivas sem árvores. As fitofisionomias campestres do Domínio do Cerrado são: Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre (COUTINHO, 1990; 2000; RIBEIRO & WALTER, 1998).

As fitofisionomias Cerradão, Cerrado *stricto sensu*, Campo Cerrado, Campo Sujo e Campo Limpo formam o Cerrado *lato sensu* (Figura 1.2), que é a vegetação natural dominante no Domínio do Cerrado. De modo geral, o Cerrado *lato sensu* apresenta-se como um mosaico dessas diversas fitofisionomias (COUTINHO, 1990; 2000). Três fatores são considerados fundamentais na origem e distribuição dessas fitofisionomias: o pedológico, pelo oligotrofia mineral, toxidez por alumínio e diferenças de drenagem e profundidade dos solos; o pirogênico, pela ação do fogo na biota; e o climático, principalmente pelo efeito sazonal que limita a disponibilidade de água (COUTINHO, 1990; 2000; RIBEIRO & WALTER, 1998). Desde o século passado, o fator antrópico passou a causar modificações intensas na paisagem do Domínio do Cerrado, com a abertura de áreas para produção agropecuária, produção de carvão, retirada seletiva de madeira, construção de cidades e estradas e uso freqüente do fogo (COUTINHO, 1990; ALHO & MARTINS, 1995).



Figura 1.2 – Fitofisionomias do Cerrado *lato sensu*.

O clima predominante no Cerrado é tropical-quente-subúmido (Aw), caracterizado por forte sazonalidade das chuvas e estabilidade da temperatura média diária (DIAS, 1996). Devido à sua grande extensão o Cerrado apresenta uma significativa variabilidade climática regional. A precipitação anual média mostra tendência de aumento na direção Leste-Oeste, variando de 600 a 2000 mm, com 75% da área do Cerrado com precipitação entre 1000 e 1600 mm (ASSAD & EVANGELISTA, 1994) (Figura 1.3). O período de estiagem, quando ocorre de 5 a 10% da precipitação, mostra variação temporal na direção Sudoeste-Nordeste, ocorrendo de maio a setembro nas regiões Sudoeste e Central do Cerrado e junho a novembro na Nordeste (CASTRO *et al.*, 1994). As temperaturas mais elevadas ocorrem durante a primavera-verão, com médias mensais de 26 a 30°C no Norte do Cerrado, 24 a 26°C nas áreas baixas do Centro e Sul, e 20 a 24°C nas regiões elevadas dos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Bahia e Minas Gerais. As médias mensais das temperaturas máximas

variam de 30 a 36°C de Sul para Norte, podendo atingir valores diários ao redor de 40°C. No inverno, na maior parte do Cerrado, as médias mensais são superiores a 20°C, sendo nos estados de Tocantins, Maranhão e Piauí acima de 24°C, enquanto nas áreas altas apresentam valores entre 15 e 20°C. As médias mensais das temperaturas mínimas variam de 12 a 16°C, de Sul para Norte do Cerrado, nas áreas baixas, exceto nos estados do Maranhão e Piauí, sendo de 06 a 12°C nas áreas altas, podendo atingir em alguns locais valores diários em torno de 0°C (NIMER & BRANDÃO, 1989).

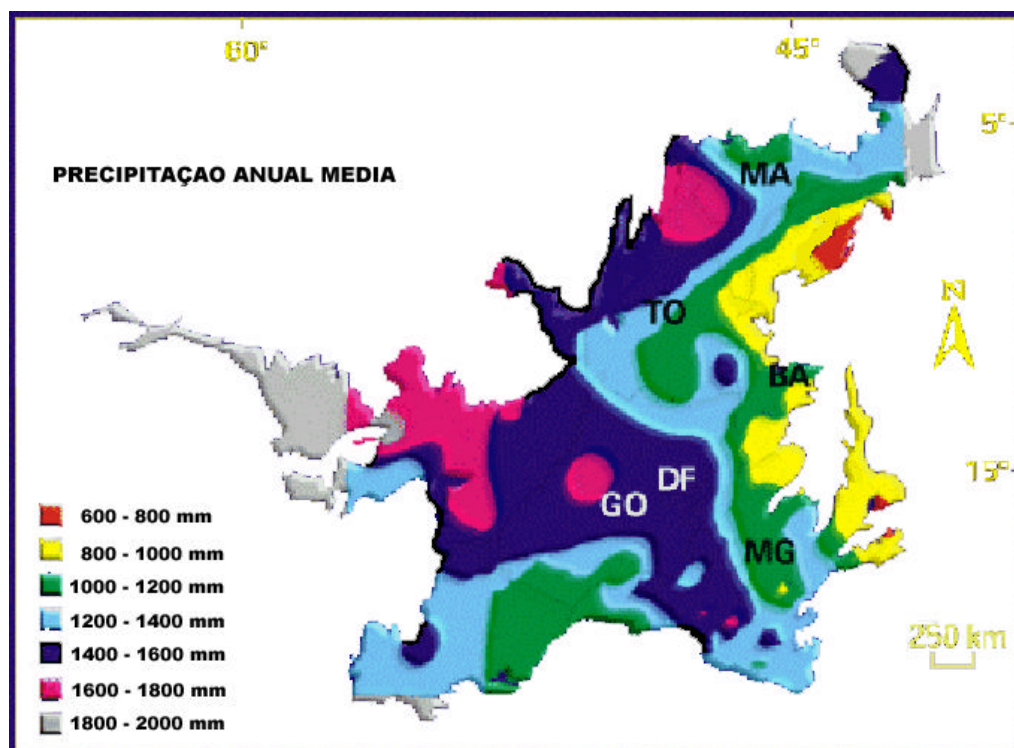


Figura 1.3 – Precipitação anual média do Cerrado.
Fonte: adaptado de ASSAD & EVANGELISTA (1994).

O solo do Cerrado é antigo, profundo e bem drenado, de baixa fertilidade, com alta toxidez e acidez pelo acúmulo de óxidos de ferro e alumínio. Os tipos mais comuns são: latossolo, que ocupa 46% do Cerrado; podzólico com 15% da área; areia quartzosa com 15%; plintossolo com 9%; litólico com 7%; cambissolo com 3%; e hidromórfico com 2% (REATTO *et al*, 1998). As altitudes variam de 30 a mais de 1600 m com 95% da área entre 300 e 900 m, onde o relevo varia de plano a suavemente ondulado com a presença de amplos planaltos, favorecendo a agricultura mecanizada e a irrigação (DIAS, 1996).

1.2 - Biodiversidade e 'Hotspots'

O Cerrado destaca-se com relação à alta biodiversidade por diversas razões: sua vasta extensão, aliada à posição geográfica central, compartilhando espécies com quatro outros biomas — Amazônia, Caatinga, Mata Atlântica e Pantanal; sua heterogeneidade vegetal; e por conter trechos das três maiores bacias hidrográficas da América do Sul, dos rios Tocantins, São Francisco e Prata. A biodiversidade do Cerrado está estimada em cerca de um terço da fauna e flora brasileira e 5% da mundial (Tabela 1.1). Muitas plantas têm usos alimentícios e medicinais, além de utilidades têxteis, corticeiras, oleaginosas, ornamentais e artesanais (ALHO & MARTINS, 1995).

Tabela 1.1 – Número total e endêmico de espécies do Cerrado.

	Total de Espécies	Espécies Endêmicas	% Espécies Endêmicas
Vegetação	10.000	4.400	44
Veg. arbórea	774	429	55
Mamíferos	161	19	12
Aves	837	29	4
Répteis	120	24	20
Anfíbios	150	45	30

Fonte: adaptado de CONSERVATION INTERNATIONAL(2002) e ALHO & MARTINS (1995).

A diminuição da biodiversidade, além de causar mudanças nos ecossistemas naturais e nos seus processos ecológicos, pode ser um processo irreversível, sendo muito difícil recuperar o que foi formado de forma tão singular ao longo de bilhões de anos na história evolutiva de nosso planeta. A importância da conservação da biodiversidade alcançou destaque mundial durante a ECO-92, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Desde então, foram consolidados fundos mundiais voltados especificamente para a conservação e cresceram os investimentos de agências governamentais multilaterais e bilaterais de fomento e os de fundações privadas ligadas ao meio ambiente. Também têm aumentado o número de empresas privadas que apóiam projetos de conservação em todo o mundo (CONSERVATION INTERNATIONAL [CI], 2002).

Apesar desses avanços, há muito a ser feito uma vez que os recursos humanos e financeiros são escassos. Dessa forma, os grandes desafios são estabelecer prioridades para as ações de conservação e para investir os referidos recursos de maneira eficiente. Uma das estratégias tem sido concentrar os esforços e investimentos em áreas prioritárias, tendo como diretriz o conceito dos 'hotspots', que estabelece áreas críticas para conservação em todo o mundo (MYERS *et al.*, 2000). Estudos recentes ampliaram e atualizaram essa abordagem,

estabelecendo 25 hotspots. A escolha dessas regiões críticas considera que a biodiversidade não está igualmente distribuída, com cerca de 44% de espécies de plantas vasculares e 35% dos animais vertebrados concentrados em apenas 1,4% da superfície terrestre. Essa abordagem prioriza as ações nas áreas de maior biodiversidade, protegendo as espécies em extinção e mantendo o amplo espectro de vida no planeta. O critério mais importante na determinação dos hotspots é a existência de espécies endêmicas, isto é, que são restritas a um ecossistema específico e, portanto, com maior risco de extinção. Outro critério importante é o grau de ameaça ao ecossistema, sendo consideradas como hotspots onde 70% ou mais da vegetação original tenha sido destruída (MYERS *et al.*, 2000).

O Cerrado está incluído na atual lista de hotspots. Com uma flora considerada entre as mais ricas das savanas, o Cerrado possui alto grau de endemismo. De suas 10 mil espécies de plantas, 44% são endêmicas, incluindo quase todas as gramíneas (CI, 2002) (Tabela 1.1). Junto com a Mata Atlântica, o Cerrado é o ecossistema brasileiro que mais alterações sofreu com a ocupação humana. Atualmente, a destruição e a fragmentação de habitats consistem na maior ameaça à integridade dessa região.

A ocupação do Cerrado foi iniciada no século XVIII com a exploração do ouro e pedras preciosas. Com o esgotamento das minas, a principal atividade econômica na região passou a ser a pecuária bovina extensiva, realizada em pastagens naturais, situação que perdurou até o final da década de 60 do século passado. Relativamente conservado até então, o Cerrado passou a sofrer maior ameaça com a construção de Brasília e com os incentivos governamentais aplicados no setor agropecuário, que expandiram a ocupação da região com culturas agrícolas e bovinocultura em pastagem implantada. Apesar das restrições edáficas, o manejo de solos com novas técnicas, aliado à textura e topografia adequadas, ao baixo custo da terra e ao desenvolvimento da malha viária, transformaram o Cerrado na maior região produtora de grãos do Brasil (ALHO & MARTINS, 1995; CI, 2002). Considerando apenas a produção da região Centro-Oeste e do estado de Tocantins em 2000, a região possui cerca de 40% do rebanho bovino e foi responsável por aproximadamente 70% do algodão, 50% da soja, 25% do arroz e 20% do milho produzidos no Brasil (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA [IBGE], 2001).

As principais ameaças à biodiversidade do Cerrado estão basicamente relacionadas a duas atividades econômicas: a pecuária extensiva de baixa tecnologia, que ocupa cerca de 60% de sua área, e a cultura intensiva de grãos, principalmente soja, que ocupa cerca de 6%. Estimativas indicam que cerca de 65 a 80% da área do Cerrado já foram modificados pela ação humana devido à expansão agropecuária e urbana, produção de carvão e construção de

estradas. Somente de 20 a 35% correspondem a áreas nas quais a vegetação ainda conserva suas características originais (MANTOVANI & PEREIRA, 1998; CI, 2002). Os poucos fragmentos de vegetação com essas características devem ser considerados prioritários para implementação de áreas protegidas, uma vez que apenas 3% do Cerrado se encontram oficialmente em unidades de conservação federais ou estaduais. Para agravar a situação, existe um número reduzido de áreas protegidas do Cerrado com tamanho superior a 100 mil hectares, o que mostra evidências da fragmentação do ecossistema (CI, 2002).

A ameaça à biodiversidade do Cerrado tem sua origem em questões fundamentais nacionais e internacionais, ligadas às políticas públicas e aos modelos econômicos vigentes. Historicamente, a expansão agropecuária, o extrativismo vegetal e o mineral no Cerrado são caracterizados por um modelo econômico predatório, com graves conseqüências para a conservação da natureza na região. O programa de preservação ambiental, além de incorporar técnicas modernas de conservação na agropecuária, deve promover duas ações para a proteção da biodiversidade local: 1) retenção de áreas com vegetação nativa em toda região cultivada; 2) implementação 'real' de unidades de conservação com urgência. O sistema brasileiro de unidades de conservação ainda está em estágio embrionário e frágil por diversos fatores. O mais grave é a falta de regularização das terras, pois muitas das unidades existem apenas no papel, sem proteção e manejo. Somado a isso existem outros fatores agravantes, tais como: caça, corte seletivo de madeira, incêndios, proliferação de pragas, invasão por espécies exóticas e poluição (ALHO & MARTINS, 1995).

1.3 - Fogo na Vegetação do Cerrado – Causas e Efeitos

Os primeiros registros de ocorrência de fogo no Cerrado datam de aproximadamente 32 mil anos atrás. As datações existentes de povoamento dessa região pelo homem são de cerca de 11 mil anos atrás. Portanto, queimadas anteriores a este período provavelmente foram de causas não antrópicas. Embora as queimadas possam ter causas naturais, como as causadas por raios conforme observado no Parque Nacional de Emas, GO por RAMOS NETO (2000), a ocorrência freqüente desde há 11 mil anos sugere as atividades antrópicas como sua causa principal (FERRAZ-VICENTINI & SALGADO-LABORIAU, 1996; SALGADO-LABORIAU *et al.*, 1997; BARBIERI *et al.*, 2000). A ocupação humana resultou em um aumento da freqüência das queimadas, geralmente realizada durante a seca, com vários propósitos: limpeza de áreas, manejo de pastagens, caça de animais; manejo de plantas alimentares nativas; controle de animais peçonhentos, limpeza de caminhos; auxílio nas

guerras tribais. Além disso, teria efeito estético no céu noturno (ANDERSON & POSEY, 1985; COUTINHO, 1990).

Atualmente, apesar da utilização de modernas técnicas na agropecuária, ainda é mantida a prática de manejo antiga e barata que usa o fogo para renovação e limpeza de pastagens, bem como para abertura e limpeza de áreas agrícolas (COUTINHO, 1990; 2000; MISTRY, 1998a; 1998b). Por outro lado, o fogo deixou de ser usado na limpeza de restos de culturas anuais mecanizadas (RAMOS NETO, 2000).

COUTINHO (1990) e FRANÇA (2000) estimaram que de 20 a 30% do Cerrado são queimados anualmente. Esta elevada incidência de queimadas tem sido relacionada com efeitos prejudiciais ao ambiente, tais como: redução da biodiversidade; erosão do solo pela sua maior exposição à chuva (ALHO & MARTINS, 1995; MUELLER-DUMBOIS & GOLDAMMER, 1990); empobrecimento do solo pela perda de nutrientes; poluição no âmbito local, como a causada pelo O₃, composto resultante de emissão de CO, hidrocarbonetos e NO_x; mudanças químicas na atmosfera global pela emissão de CO e CH₄; mudanças climáticas em escala regional e global decorrentes da emissão de CO₂ e CH₄ (principais gases responsáveis pelo efeito estufa), aerossóis e material particulado, que influenciam o balanço radiativo e hidrológico (CRUTZEN & ANDREAE, 1990; MUELLER-DUMBOIS & GOLDAMMER, 1990). Por outro lado, a completa supressão do fogo também acarreta efeitos ambientais no Cerrado, como a redução de biodiversidade e aumento da densidade de plantas lenhosas com alteração na composição florística e fisionômica da vegetação (PIVELLO & NORTON, 1996; MOREIRA, 1996; COUTINHO, 2000).

1.4 - Condições para Ocorrência de Fogo na Vegetação do Cerrado

Três condições simultâneas são necessárias para que uma queimada ocorra em vegetação: a) condições meteorológicas propícias; b) disponibilidade de combustível vegetal; c) existência de fonte de ignição. A 'susceptibilidade ao fogo' é a possibilidade de atendimento a estas três condições. No Cerrado, as condições meteorológicas da estação chuvosa propiciam o acúmulo de fitomassa combustível, enquanto que as do período de estiagem secam a maior parte desse material, tornando-o inflamável (OLIVEIRA, 1998; RAMOS NETO, 2000).

Combustível vegetal é considerado neste trabalho como toda vegetação viva ou morta com diâmetro inferior a 6 mm (MIRANDA *et al.*, 1996). Dados de literatura mostram que a quantidade de combustível vegetal nas fitofisionomias do Cerrado varia entre 3,9 e 12,9 t/ha, sendo geralmente formado por gramíneas (WARD *et al.*, 1992; PIVELLO & COUTINHO,

1992; CASTRO & KAUFFMAN, 1998; RAMOS NETO, 2000). Em pastagens implantadas é cerca de 8,0 t/ha (BARBOSA & FEARNSSIDE, 1996). A quantidade de combustível pode ser estimada diretamente em pequenas áreas, mas é inviável em áreas de dimensões subcontinentais como o Cerrado. Uma das alternativas estudadas tem sido a estimativa indireta com o uso de imagens de sensores orbitais, tanto por meio de índices de vegetação como pelo mapeamento do uso da terra e dos tipos de vegetação (CHUVIECO *et al.*, 1997). Por exemplo, corpos d'água são áreas sem combustível, enquanto a maioria das áreas de vegetação natural do Cerrado tem quantidade de combustível suficiente para a queima. Áreas queimadas estão sem combustível temporariamente, até que a vegetação cresça e acumule combustível durante a estação chuvosa seguinte à ocorrência do fogo.

Havendo combustível vegetal em quantidade suficiente para a queima, são necessárias condições meteorológicas para secá-lo, pois a umidade do combustível tem relação direta com sua inflamabilidade (RONDE *et al.*, 1990; CHUVIECO & MARTIN, 1994). Quando a umidade do combustível é inferior a 30% pode ocorrer a queima, e quando é inferior a 7% existe a condição ideal para o início e espalhamento de uma queimada. Com a umidade ao redor de 35% a queima do combustível é ineficiente ou pode nem ocorrer (NOBLE *et al.*, 1980; RONDE *et al.*, 1990). Durante o período de estiagem, existem as melhores condições para queima da cobertura vegetal do Cerrado, porque a parte aérea do estrato herbáceo, formado principalmente por gramíneas, desseca em consequência da falta de água na camada superficial do solo. Os estratos arbóreo e arbustivo são os menos afetados, devido à grande profundidade de suas raízes, as quais atingem a camada úmida do solo (OLIVEIRA, 1998). FRANÇA (2000) mostrou que entre 70 a 75% da área queimada no Cerrado ocorreram no período seco.

Parâmetros meteorológicos têm sido utilizados para estimativa da umidade do combustível vegetal uma vez que medidas diretas da mesma são inviáveis para grandes áreas como o Cerrado, e porque ela varia em função da precipitação, umidade relativa do ar, temperatura do ar e vento (CHUVIECO & MARTIN, 1994). De modo geral, ocorrência de precipitação e alta umidade relativa do ar diminuem a possibilidade de incêndios e vice-versa. Umidade do ar inferior a 30-40% é condição ótima para o início e espalhamento de um incêndio de difícil controle (TURNER *et al.*, 1961; RONDE *et al.*, 1990). Por outro lado, umidade do ar superior a 60% pode impedir que a combustão de material vegetal seja sustentada (RONDE *et al.*, 1990). Uma chuva de 10 a 20 mm molha o solo e o combustível, impedindo sua queima no mesmo dia (SOARES, 1985; RONDE *et al.*, 1990). A temperatura do ar não é um fator limitante para a queima, mas valores acima de 25°C propiciam boas

condições para a ocorrência de fogo (RONDE *et al.*, 1990), e quanto maior a temperatura mais provável uma fonte de ignição resultar em queimada (DEEMING *et al.*, 1974).

Além dos parâmetros meteorológicos, dados de sensores orbitais estão sendo utilizados para auxiliar na estimativa da umidade da vegetação, tendo como vantagem principal a obtenção de imagens sobre extensões continentais, em intervalos regulares de tempo, com adequada resolução espacial (CHUVIECO & MARTIN, 1994). Estudos iniciados na década de setenta do século passado mostraram forte correlação entre índices de vegetação obtidos de dados espectrais e parâmetros biofísicos da vegetação, como fitomassa foliar verde, Índice de Área Foliar (IAF) (TUCKER, 1979; TUCKER & SELLERS, 1986) e umidade da fitomassa (PALTRIDGE & BARBER, 1988). Dessa forma, índices de vegetação baseados em imagens orbitais têm sido utilizados para estimar a umidade da vegetação.

A ação humana é a principal fonte de ignição para iniciar o fogo (COUTINHO, 1990; 2000; MISTRY, 1998a; 1998b). Em entrevistas com 40 fazendeiros no Distrito Federal, MISTRY (1998b) determinou que 86% deles escolheram do meio para o final da estação seca como época para realização das queimadas. Além disso, 72% dos fazendeiros utilizaram indicadores climáticos para determinar o momento de atear fogo à vegetação, selecionando dias com altas temperaturas do ar e baixa umidade relativa do ar. No entanto, 21% deles escolheram com base em fases da lua, conforme o objetivo da queimada, e 7% utilizaram indicadores idiossincráticos.

Porém, conforme observado anteriormente, queimadas no Cerrado também podem ser causadas por raios, conforme mostrou RAMOS NETO (2000) para o Parque Nacional de Emas, GO. Neste parque, protegido do fogo de origem antrópica desde 1995, cerca de 90% das 45 queimadas ocorridas no período de 1995 a 1999 foram originadas por raios. Além disso, esse estudo mostrou que cerca de 70% das queimadas ocorreram no período de chuvas. Porém, cerca de 60% da área afetada pelo fogo resultaram de queimadas ocorridas no período de seca.

A existência de uma fonte de ignição geralmente está relacionada com a decisão humana de onde e quando queimar a vegetação, a qual depende de vários fatores, inclusive ambientais, econômicos, políticos e culturais. Para prever esse comportamento estão sendo estudados indicadores da ação antrópica que de alguma forma possam estar relacionados às queimadas, entre os quais uso da terra, malha viária, áreas urbanas, densidade populacional, etc. (CHUVIECO *et al.*, 1997; FERRAZ & VETTORAZZI, 1998). Outro indicador é o histórico das queimadas que compreende dados de áreas queimadas e de localização de focos de incêndios. Estes dados poderiam auxiliar na previsão de onde e quando a ação humana de

usar o fogo poderia ocorrer, porque é razoável supor que quanto mais próximo no espaço e no tempo de queimadas ocorridas anteriormente, maior será a possibilidade de ocorrência de fogo, pois indicariam locais e períodos com as condições necessárias para ocorrência de fogo (CHUVIECO *et al.*, 1997). As imagens de sensores orbitais também podem ser utilizadas no mapeamento do uso da terra, de áreas queimadas e na detecção de focos de incêndios.

1.5 - Índices de Susceptibilidade ao Fogo

Atualmente, tem sido atribuída maior importância à prevenção do que à supressão do fogo, pois é mais fácil evitar uma queimada ou combatê-la no começo do que quando estabelecida e em propagação (SOARES, 1985). O conhecimento da susceptibilidade possibilita o planejamento de medidas preventivas, otimizando a alocação de recursos pela melhor relação custo/benefício em comparação com as medidas supressivas (SOARES, 1985). Em função do grau de susceptibilidade, algumas medidas preventivas no âmbito local podem ser tomadas para reduzir as ocorrências de incêndio, tais como: maior vigilância nas áreas com maior susceptibilidade; restrição de acesso a esses locais; construção de aceiros preventivos; reorganização das práticas de manejo agropecuário. Também podem ser tomadas medidas auxiliares para o combate inicial ao fogo, como construção de estradas de rápido acesso aos locais de maior susceptibilidade e alocação de recursos em pontos estratégicos (FERRAZ & VETTORAZZI, 1998). No âmbito regional, os índices de susceptibilidade ao fogo podem ser utilizados no manejo da vegetação do Cerrado. Uma vez conhecido o grau de susceptibilidade em uma região, seriam emitidos alertas para as áreas de maior susceptibilidade, incluindo aquelas destinadas à preservação e no entorno, nas quais o uso do fogo seria proibido. Por outro lado, nas áreas de menor susceptibilidade poderia ser autorizado o uso do fogo controlado.

Os primeiros trabalhos sobre susceptibilidade da vegetação ao fogo são do início do século passado, com os primeiros índices sendo desenvolvidos na década de quarenta (TURNER *et al.*, 1961). Em 1972 foi finalizado o primeiro índice nacional de susceptibilidade, conhecido como fórmula de Monte Alegre (SOARES, 1985).

Entre os índices de susceptibilidade ao fogo existem os que utilizam somente dados meteorológicos e aqueles que também incorporam dados vegetacionais e antrópicos. Os parâmetros meteorológicos relacionados à umidade da vegetação variam em curto prazo de tempo, sendo de caráter diário. Índices de susceptibilidade mais antigos utilizam apenas esse tipo de dado, tais como o **Angstrom**, desenvolvido na Suécia em 1942, o **Nesterov**, criado na Rússia em 1949 e o **Monte Alegre**, desenvolvido no Brasil em 1972 (TURNER *et al.*, 1961;

SOARES, 1985). Além dos dados meteorológicos, os índices mais recentes utilizam estimativas da umidade da vegetação obtidas de imagens de sensores orbitais.

Os índices que utilizam simultaneamente múltiplos parâmetros tiveram impulso com o advento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que permitiram a utilização de dados de naturezas diversas com maior resolução espacial e temporal. Além dos dados meteorológicos e imagens de sensores orbitais utilizados para estimar a umidade da vegetação, foram incorporados parâmetros de longo prazo, de caráter anual ou permanente, como por exemplo: tipo de vegetação; tipo e quantidade de combustível vegetal; padrões meteorológicos sazonais; declividade; exposição solar; uso da terra; malha viária; restrição de acesso; rede de aceiros; densidade populacional; padrões de distribuição espaço-temporal das queimadas (CHUVIECO *et al.*, 1997; FERRAZ & VETTORAZZI, 1998). Entre esses índices, são citados: **‘McArthur’s Fire Danger Meters’ (MK5)**, lançado em 1968 na Austrália (NOBLE *et al.*, 1980); **‘National Fire Danger Rating System’ (NFDRS)**, desenvolvido pelo ‘Forest Service’ (FS) dos EUA, lançado em 1972 (DEEMING *et al.*, 1974, 1977); **‘Canadian Forest Fire Danger Rating System’ (CFFRDS)**, desenvolvido pelo ‘Canadian Forest Service’ (CFS, 1999); **Risco de Fogo (RFC)**, desenvolvido pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Brasil, lançado em 1998 (SISMANOGLU *et al.*, 2002). Alguns índices de susceptibilidade ao fogo foram desenvolvidos para aplicação em áreas mais restritas, como o **Firetool** (PIVELLO & NORTON, 1996) e o **Mapeamento de Risco de Incêndio** (FERRAZ & VETTORAZZI, 1998), desenvolvidos no Brasil, e o **BehavePlus**, criado nos EUA pelo FS (FS, 2002).

1.6 - Objetivos

O objetivo deste trabalho foi verificar a susceptibilidade da vegetação do Cerrado ao fogo com base em análises das condições meteorológicas, da cobertura vegetal e da proximidade de atividades antrópicas. Estes parâmetros estão relacionados aos três requisitos necessários para a ocorrência de queimadas na vegetação — condições meteorológicas propícias, disponibilidade de combustível vegetal e existência de fonte de ignição — para as quais as informações existentes para o Cerrado são escassas ou inexistentes.

Especificamente, os objetivos são: 1) avaliar a relação entre as condições meteorológicas e a susceptibilidade da vegetação do Cerrado ao fogo; 2) propor um método para classificação da cobertura vegetal do Cerrado quanto à susceptibilidade ao fogo utilizando mosaicos quinzenais de imagens do sensor ‘Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) a bordo do satélite National Oceanic and Atmospheric Administration’

(NOAA); 3) avaliar a susceptibilidade da vegetação do Cerrado ao fogo em relação à proximidade de dois indicadores de atividades antrópicas: distância da malha viária e de focos de queimadas ocorridos anteriormente.

1.7 - Materiais e Método - Resumo

1.7.1 - Área de estudo

A área de estudo foi a mesma utilizada por PEREIRA JR. (1992) e FRANÇA (2000), segundo interpretação do Mapa de Vegetação do Brasil produzido pelo IBGE (1993). Ela abrange a porção contínua da Região Fitoecológica do Cerrado definida como 'Savana' no Mapa de Vegetação, junto com as áreas de 'Tensão Ecológica', que indicam o contato entre Cerrado e outros tipos de vegetação. Enclaves de 'Floresta' ou Caatinga, esta definida como 'Savana Estépica', também estão incluídos. A área incluiu tanto as regiões de cobertura vegetal natural quanto as antropizadas. A área de estudo ocupa 2 200 000 km², cobrindo cerca de um quarto do território brasileiro, entre os paralelos 02°30' S e 26°00' S e os meridianos 41°45' O e 62°00' O, abrangendo a totalidade do Distrito Federal, a maior parte dos estados de Goiás, Tocantins e Mato Grosso do Sul, e parte dos estados de Mato Grosso, Maranhão, Piauí, Minas Gerais, Bahia, São Paulo, Paraná, Rondônia e Pará (Figura 1.4).

1.7.2 - Materiais

Para processamento dos dados georreferenciados foi utilizado o Sistema de Informações Geográficas (SIG) SPRING 3.5 para ambiente Windows (CÂMARA *et al.*, 1996; DIVISÃO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS / INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS [DPI/INPE], 2002).

Além disso, foram utilizados:

- a) dados diários das coordenadas geográficas dos focos de queimadas detectados no período de maio a outubro/1998 em imagens digitais do canal3 (3,7 µm, infravermelho termal) do sensor AVHRR a bordo do satélite NOAA-12, passagem vespertina (21h30 GMT). Os dados foram gerados pela Divisão de Satélites Ambientais (DSA) do INPE, baseado no método descrito por PEREIRA (1987) e PEREIRA & SETZER (1993), com acurácia de 2 km conforme PEREIRA & SETZER (2001). Um exemplo da distribuição espacial dos focos de queimadas de uma data é apresentado na Figura 1.5;

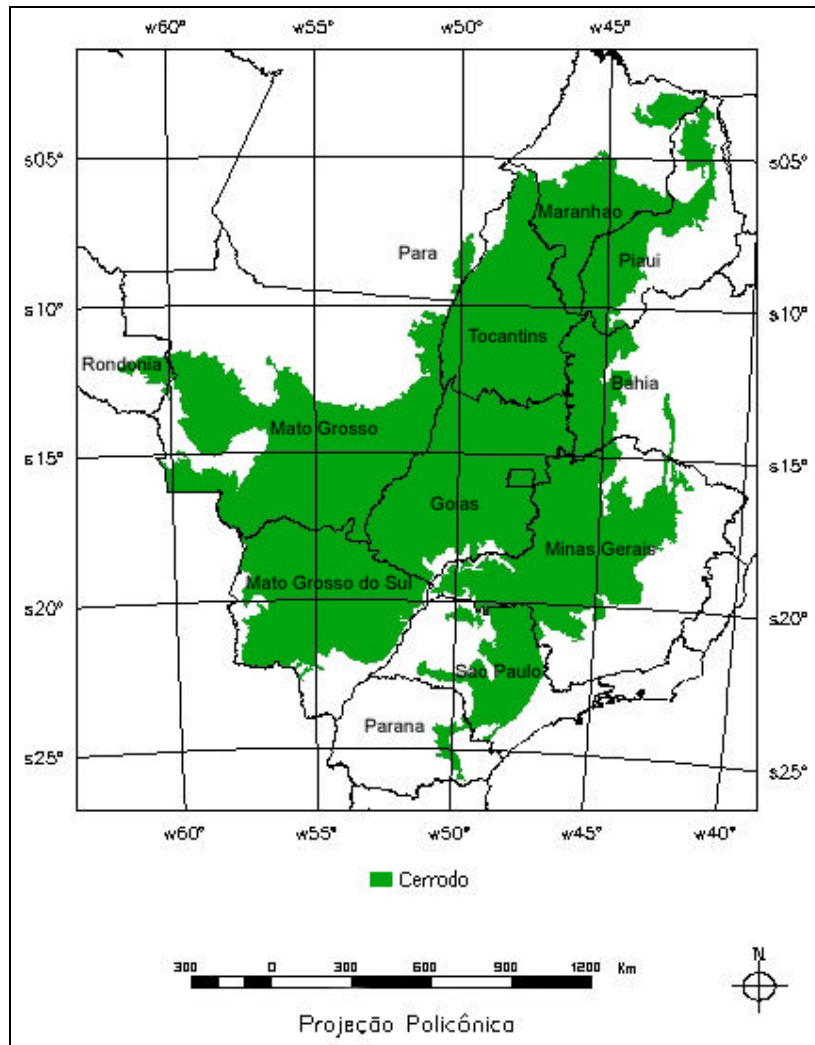


Figura 1.4 – Área de estudo com extensão de 2.200.000 km².
 Fonte: PEREIRA JR. (1992) e FRANÇA (2000).

- b) dados meteorológicos diários extraídos do banco de dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Este banco é composto por dados das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e das Plataformas de Coleta de Dados (PCD) do INPE, cujas localizações estão na Figura 1.5. Desses dados, foram utilizados os seguintes parâmetros meteorológicos no período de maio a outubro/1998: precipitação das últimas 24 horas, coletada às 12h00 GMT; umidade relativa e temperatura do ar, coletadas às 18h00 GMT;
- c) a malha viária principal do Cerrado, com rodovias e ferrovias, fornecida pelo IBGE (1997) (Figura 1.5);

- d) os mosaicos quinzenais do canal 3 (3,7 μm) e do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN), com resolução espacial de 1,5 km, gerados de séries de imagens digitais do sensor AVHRR a bordo do satélite NOAA-14, passagem vespertina (18h30 GMT). Cada mosaico corresponde a um intervalo de quatorze a dezesseis dias consecutivos, do dia 01 a 14, e de 15 a 30 ou 31 de cada mês, do período de maio a outubro/1998, obtidos por FRANÇA (2000) (Figura 1.6).

Mosaico é uma imagem resultante da união de outras imagens digitais. Nas áreas onde ocorre sobreposição das imagens originais são estabelecidos critérios para atribuição do valor numérico dos pixels da nova imagem. A sobreposição de imagens AVHRR/NOAA de dias diferentes é quase total. A utilização de mosaicos quinzenais do AVHRR diminui os problemas das imagens relacionados ao ângulo de imageamento, nuvens e ruídos, e cobertura parcial da área de estudo (HOLBEN, 1986).

O canal 3 indica a temperatura da superfície, que na imagem AVHRR é representada por valores entre 0 e 255, com os menores valores correspondendo as maiores temperaturas e vice-versa. No caso de sobreposição das imagens AVHRR originais, o critério de atribuição do valor numérico ao pixel do mosaico quinzenal foi a máxima temperatura na quinzena.

O IVDN é obtido da fórmula $IVDN = (IP - V) / (IP + V)$, onde **IP** é a reflectância no pixel no infravermelho próximo e **V** é a reflectância no vermelho, com o valor do IVDN variando de -1,0 a +1,0 (TUCKER, 1979; TUCKER & SELLERS, 1986). No caso de sobreposição das imagens, o critério de atribuição do valor numérico ao pixel do mosaico IVDN foi o máximo IVDN na quinzena.

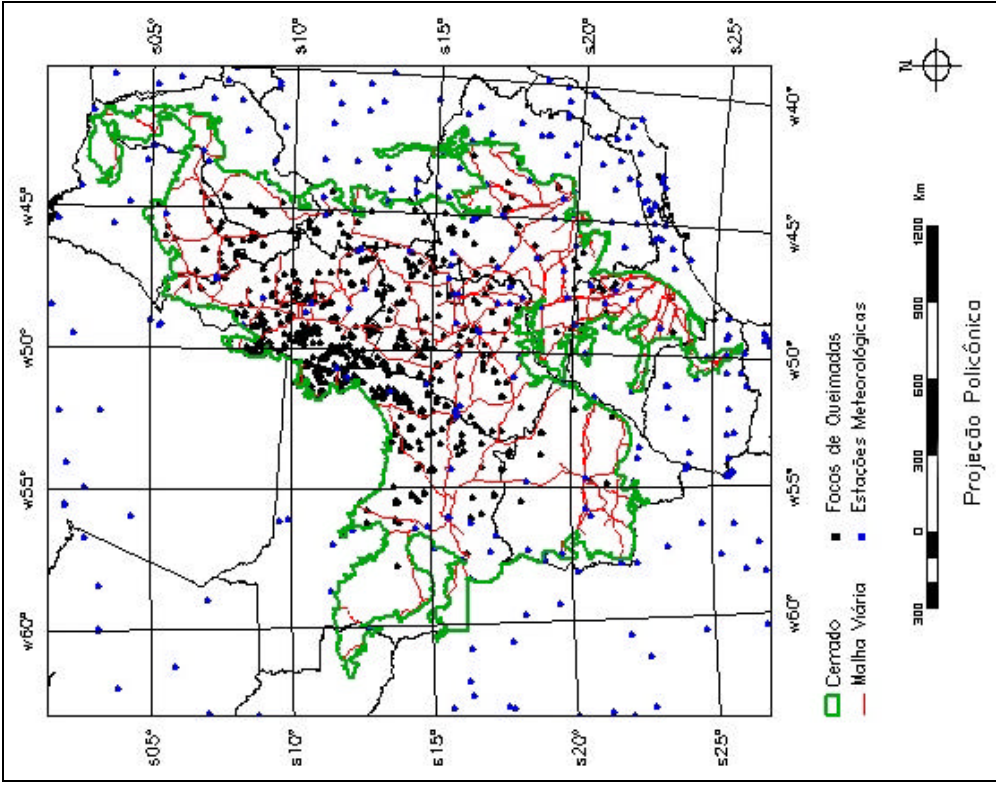


Figura 1.5 – Limite do Cerrado com os seguintes dados: focos de queimadas de 21/agosto/1998, estações meteorológicas e malha viária.

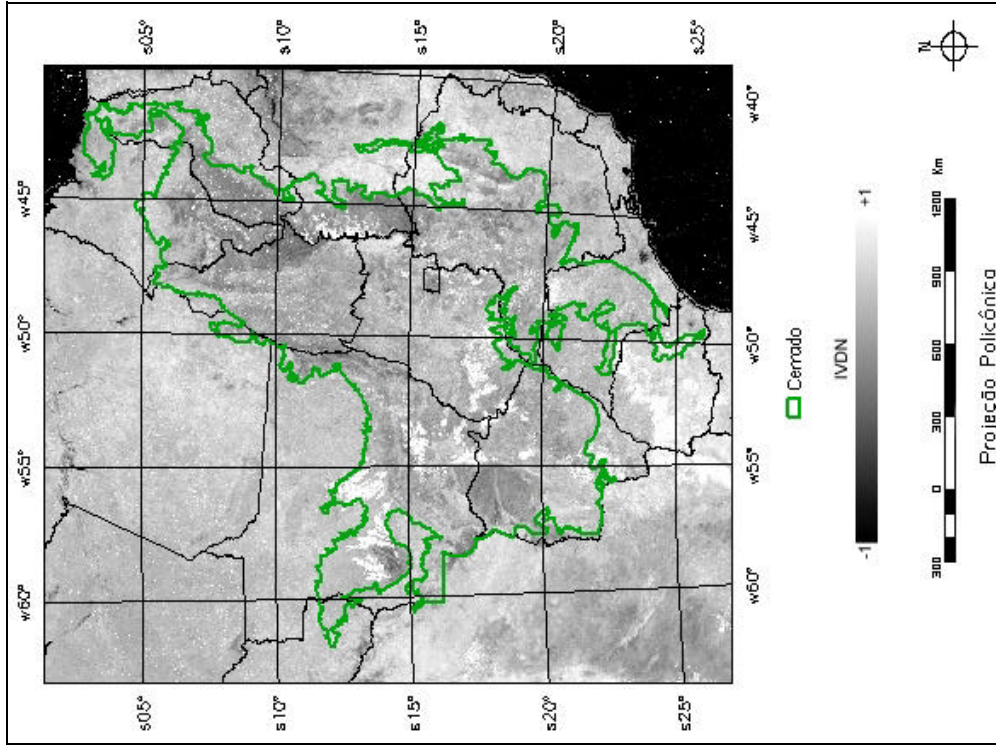


Figura 1.6 – Limite do Cerrado sobreposto ao mosaico de Índice de Vegetação gerado de imagens do sensor orbital AVHRR/NOAA-14 do período de maio a outubro/1998.

1.7.3 - Método

1.7.3.1 - Incorporação dos dados ao SIG

Os mosaicos foram incorporados ao SIG no formato matricial; a malha viária no formato de linhas vetoriais; as localizações das estações meteorológicas no formato de pontos vetoriais, aos quais foram associados os dados diários dos parâmetros meteorológicos; e os dados diários de localização dos focos de queimadas foram incorporados também no formato de pontos vetoriais. Dos dados de focos de queimadas, foram selecionados os das passagens do AVHRR/NOAA-12 com maior recobrimento do Cerrado, resultando na seleção de dados de focos de duas passagens orbitais por quinzena, totalizando 24 dias no período de maio a outubro/1998 (Tabela 1.2). Os focos de queimadas foram considerados como verdade de campo em relação à ocorrência de queimadas em vegetação do Cerrado. Eles indicam as regiões e as datas em que foram satisfeitas as três condições necessárias para a ocorrência de fogo.

Tabela 1.2 – Dias selecionados com dados de focos de queimadas no período de maio a outubro/1998.

Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro
08	04	01	03	03	01
13	09	06	12	12	05
22	18	20	16	17	19
26	22	29	21	26	23

1.7.3.2 - Geração de grades numéricas regulares e mapas de classes

Utilizando algoritmos do SIG foram geradas grades numéricas regulares que espacializaram os diferentes dados. Uma grade numérica regular é uma matriz numérica em que os pontos estão espaçados por uma distância fixa denominada resolução espacial. Os mosaicos quinzenais AVHRR/NOAA-14 (Figura 1.6) constituem uma grade numérica regular com resolução espacial de 1,5 km. Os dados meteorológicos foram utilizados para gerar grades meteorológicas diárias de cada parâmetro, com resolução de 50 km, em que o valor numérico do ponto da grade foi estimado por meio de interpolações entre os valores pontuais das estações e PCDs meteorológicas. As interpolações foram feitas pelo método da média ponderada pela distância por quadrante. Uma grade meteorológica é exemplificada na Figura 1.7. A malha viária foi usada para produzir uma grade de distância da malha viária

permanente, com resolução de 2,5 km, na qual o valor numérico de cada ponto da grade corresponde à menor distância até a malha viária. Da mesma forma, foram geradas grades de distância dos focos de queimadas diárias, na qual o valor numérico de cada ponto da grade corresponde à distância até o foco de queimada mais próximo.

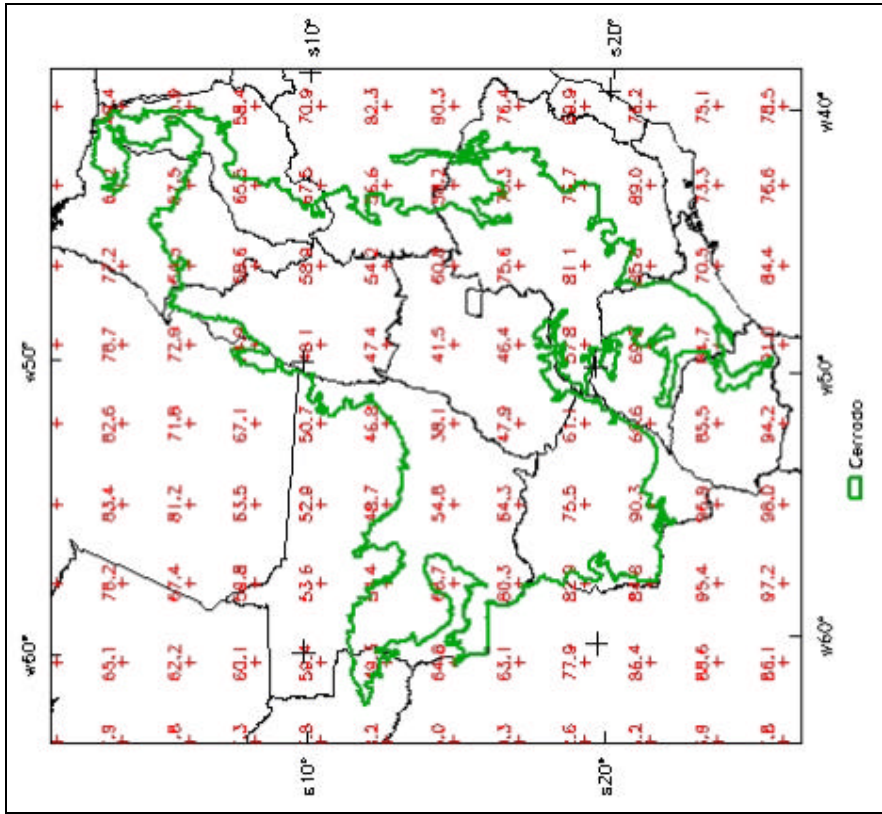
Com o uso do SIG foi possível realizar operações com as grades e gerar novas grades ou outros produtos. A operação mais utilizada foi a geração de mapas de classes com base nas grades, de modo que as classes correspondem a intervalos dos valores numéricos dos pontos da grade. Exemplos de mapas de classes que foram gerados a partir de grades de distância são mostrados na Figuras 1.8 e 1.9.

1.7.3.3 - Sobreposição dos focos de queimadas com as grades e mapas

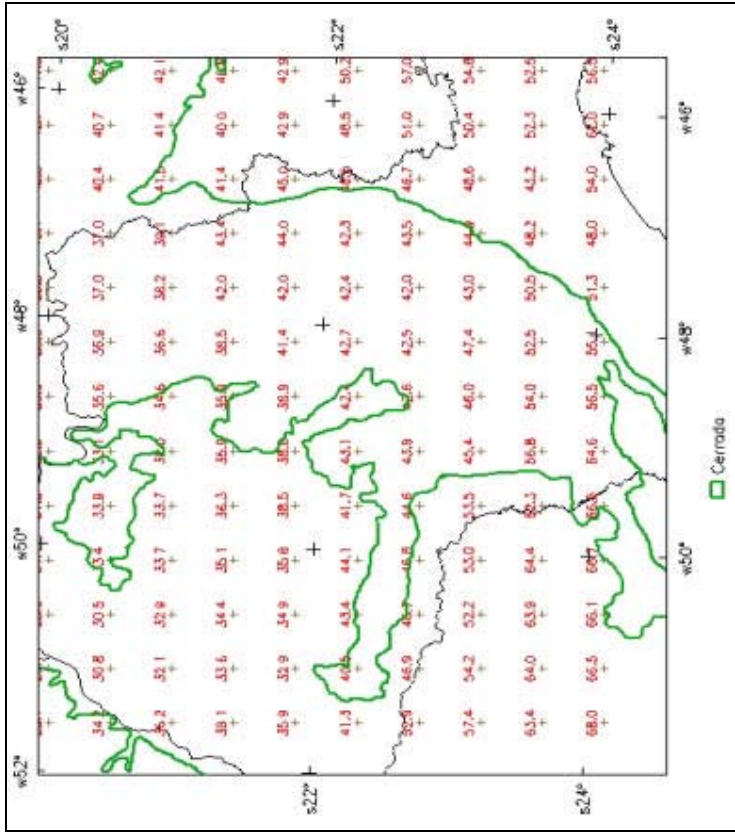
A incidência de focos por ponto da grade ou classe do mapa foi quantificada por meio de sobreposições entre as grades ou mapas e os focos de queimadas dos 24 dias selecionados.

Uma das sobreposições foi entre os focos de queimadas e as grades dos parâmetros meteorológicos. Com isto foi possível determinar diariamente o número de focos de incêndios por valor do parâmetro meteorológico analisado. Baseado nesses dados foi possível estimar as condições meteorológicas das áreas do Cerrado com e sem ocorrência de focos de queimadas. Foi feita também a sobreposição entre os focos de queimadas e os mapas de classes, para os dias selecionados, possibilitando determinar diariamente a quantidade de focos de incêndios por classe do parâmetro estudado, como classe de índice de vegetação e classe de distância. Exemplos de sobreposições realizadas com mapas de classes de distância estão na Figuras 1.8 e 1.9.

Também foram feitas interpretações visuais da sobreposição dos focos de queimadas nos mapas de classes, para os diferentes parâmetros e períodos, para analisar a distribuição espacial e temporal dos focos em função das classes.



a)



b)

Figura 1.7 – Exemplo de grade numérica regular com dados de umidade relativa do ar às 18h00 GMT do dia 21/agosto/1998: a) sobre o Cerrado; b) detalhe sobre a área do Cerrado do estado de São Paulo.

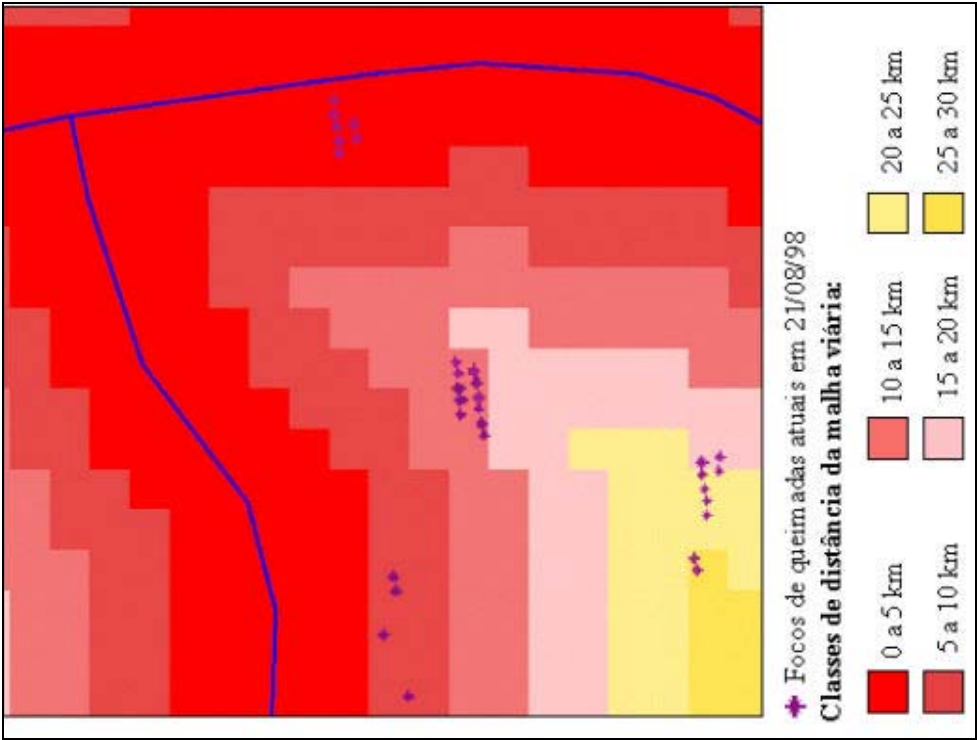


Figura 1.8 – Detalhe do mapa de classes gerado com base na grade regular de distância da malha viária e da sobreposição com focos de queimadas de 21/agosto/1998. Região centrada em 12°45'S / 49°15'O.

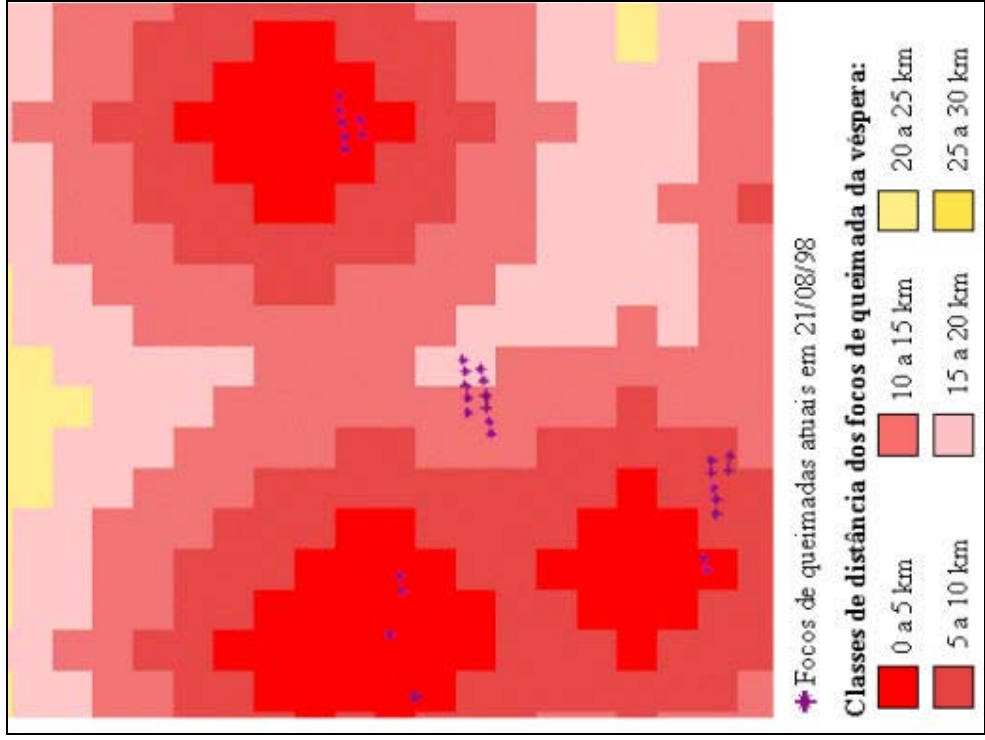


Figura 1.9 – Detalhe do mapa de classes gerado com base na grade regular de distância dos focos de 20/agosto/1998 e da sobreposição com os focos de 21/agosto/1998. Região centrada em 12°45'S / 49°15'O.

Referências

- ALHO, C.J.R.; MARTINS, E.S. 1995. **De grão em grão, o Cerrado perde espaço - Cerrado: impactos do processo de ocupação**. Brasília: Fundo Mundial para a Natureza (WWF).
- ANDERSON, A.B.; POSEY, D.A. 1985. Manejo de cerrado pelos índios Kayapó. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. 2(1):77-98.
- ASSAD, E.D.; EVANGELISTA, B.A. 1994. Análise freqüencial da precipitação pluviométrica. In: **Chuva no Cerrado: análise e espacialização**. Ed. E.D. Assad. Brasília: EMBRAPA-CPAC. p. 25-42.
- BARBERI, M.; SALGADO-LABOURIAU, M.L.; SUGUIO, K. 2000. Paleovegetation and paleoclimate of 'Vereda de Águas Emendadas', Central Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. 13(2000):241-254.
- BARBOSA, R.I.; FEARNSIDE, P.M. 1996. Pasture burning in Amazonia: Dynamics of residual biomass and the storage and release of aboveground carbon. **Journal of Geophysical Research**. 101(D20): 25847-25857.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J.; II, F.M. 1996. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. **Computers & Graphics**. 20(3):395-403.
- CANADIAN FOREST SERVICE (CFS). 1999. **Canadian Forest Fire Danger Rating System**. Disponível em: <http://fms.nofc.cfs.nrcan.gc.ca/sfms/docs/cffdrs_e.html>. Acesso em agosto/2002.
- CASTRO, E.A.; KAUFFMAN, J.B. 1998. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. **Journal of Tropical Ecology**. 14:263-283.
- CASTRO, L.H.R.; MOREIRA, A.M.; ASSAD, E.D. 1994. Definição e regionalização dos padrões pluviométricos dos Cerrados brasileiros. In: **Chuva no Cerrado: análise e espacialização**. Ed. E.D. Assad. Brasília: EMBRAPA-CPAC. p. 13-23.
- CHUVIECO, E.; MARTIN, M.P. 1994. Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. 60(5):563-570.
- CHUVIECO, E.; SALAS, F.J.; VEGA, C. 1997. Remote sensing and GIS for long-term fire risk mapping. In: **A review of remote sensing methods for the study of large**

- wildland fires**. Ed. E. Chuvieco. Alcalá de Henares, Spain: Universidad de Alcalá. p. 91-108.
- CONSERVATION INTERNATIONAL [CI], 2002. **Hotspots**. Disponível em: <<http://www.conservation.org.br/hotspots/index.htm>>. Acesso em agosto/2002.
- COUTINHO, L.M., 1990. Fire in the ecology of the Brazilian cerrado. In: **Fire in the tropical biota**. Ed. J.G. Goldammer. New York: Springer-Verlag. Cap. 6, p. 82-105.
- COUTINHO, L.M. 2000. **Cerrado**. Disponível em: <<http://eco.ib.usp.br/cerrado>>. Acesso em agosto/2002.
- CRUTZEN, P.J.; ANDREAE, M. O. 1990. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**. 250:1669-1678.
- DEEMING, J.E.; LANCASTER, J.W.; FOSBERG, M.A.; FURMAN, R.W.; SCHROEDER, M.J. 1974. **The national fire-danger rating system**. USDA Forest Service Researcher Paper RM-84. Fort Collins: Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station.
- DEEMING, J.E.; BURGAN, R.E.; COHEN, J.D. 1977. **The national fire-danger system – 1978**. USDA Forest Service General Technical Report INT-39. Ogden: Intermountain Forest e Range Experiment Station.
- DIAS, B.F.S. 1996. Cerrados: uma caracterização. In: **Alternativas de desenvolvimento dos cerrados: manejo e conservação dos recursos naturais renováveis**. Ed. B.F.S Dias. Brasília: Fundação Pró-Natureza (FUNATURA). p. 11-25.
- DIVISÃO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS / INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (DPI/INPE). 2002. SPRING. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring>>. Acesso em maio/2002.
- FERRAZ-VICENTINI, K.R.; SALGADO-LABOURIAU, M.L. 1996. Palynological analysis of a palm swamp in Central Brasil. **Journal of South American Earth Sciences**. 9(3-4):207-219.
- FERRAZ, S.F.B.; VETTORAZZI, C.A. 1998. Mapeamento de risco de incêndios florestais por meio de sistema de informações geográficas (SIG). **Scientia Forestalis**. 53:39-48.
- FOREST SERVICE (FS). 2002. BehavePlus 1.0 - **Fire Modeling System**. <<http://www.fs.fed.us/fire/planning/nist/behavel.htm>>. Acesso em agosto/2002.
- FRANÇA, H. 2000. **Metodologia de identificação e quantificação de áreas queimadas no Cerrado com imagens AVHRR/NOAA**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.

- HOLBEN, B.N. 1986. Characteristics of maximum-value composite imagens from temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**. 7(11):1417-1434.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 1993. **Mapa de Vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE. Escala 1:5.000.000
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 1997. **Mapa da série Brasil geográfico**. Rio de Janeiro: IBGE. CD-ROM.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2001. **Banco de dados agregados**. <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda>>. Acesso em julho/2001.
- MANTOVANI, J.E.; PEREIRA, A. 1998. Estimativa da integridade da cobertura vegetal do Cerrado através de dados TM/Landsat. **Anais**. 9^o Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, 11-18/setembro/1998. INPE/SELPER. CD-ROM.
- MIRANDA, H.S.; ROCHA E SILVA, E.P.; MIRANDA, A.C. 1996. Comportamento do fogo em queimadas de campo sujo. In: **Impactos de queimadas em áreas de cerrado e restinga**. Ed. H.S.Miranda, C.H.Saito, B.F.S.Dias. Brasília: Departamento de Ecologia (ECL) / Universidade de Brasília (UnB). p. 1-10.
- MISTRY, J. 1998a. Fire in the cerrado (savannas) of Brazil: an ecological review. **Progress in Physical Geography**. 22(4):425-448.
- MISTRY, J. 1998b. Decision-making for fire use among farmers in savannas: an exploratory study in the Distrito Federal, central Brazil. **Journal of environmental Management**. 54:321-334.
- MOREIRA, A. 1996. Proteção contra o fogo e seu efeito na distribuição e composição de espécies de cinco fisionomias de cerrado. In: **Impactos de queimadas em áreas de cerrado e restinga**. Ed. H.S.Miranda, C.H.Saito, B.F.S.Dias. Brasília: Departamento de Ecologia (ECL) / Universidade de Brasília (UnB). p 112-121.
- MUELLER-DUMBOIS, D.; GOLDAMMER, J.G. 1990. Fire in the tropical ecosystems and global environmental change: an introduction. In: **Fire in the tropical biota**. Ed. J.G. Goldammer, New York: Springer-Verlag. p. 1-10.
- MYERS, N.; MITTERMEIER, R.A.; MITTERMEIER, C.G.; FONSECA, G.A.B.; KENT, J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**. 403:853-858.
- NIMER, E.; BRANDÃO, A.M.P.M. 1989. **Balanço hídrico e clima da Região dos Cerrados**. Rio de Janeiro: IBGE.
- NOBLE, I.R.; BARY, G.A.V.; GILL, A.M. 1980. McArthur's fire-danger meters expressed as equations. **Australian Journal of Ecology**. 5:201-203.

- OLIVEIRA, P.E. 1998. Fenologia e biologia reprodutiva das espécies de Cerrado. In: **Cerrado: Ambiente e Flora**. Ed. S.M. Sano e S.P. Almeida. Planaltina: EMBRAPA/CPAC. p. 169-192.
- PEREIRA JR., A. C. 1992. **Monitoramento de queimadas na região dos Cerrados com utilização de dados AVHRR/NOAA corrigidos com dados TM/Landsat**. Dissertação (Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos. (INPE-5490-TDI/507).
- PEREIRA, J.A.R.; SETZER, A. 2001. Brazilian Validation of AVHRR fire pixels. In: **Global and regional vegetation fire monitoring from space: planning a coordinated international effort**, Ed. F. Ahern, J.G. Goldammer, C. Justice. Netherlands: Academic Publishing.
- PEREIRA, M.C. 1987. **Detecção, monitoramento e análise de alguns efeitos ambientais de queimadas na Amazônia através da utilização de imagens dos satélites NOAA e Landsat, e dados de aeronave**. Dissertação (Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos. (INPE-4503-TDL/326).
- PEREIRA, M.C.; SETZER, A.W. 1993. Spectral characteristics of deforestation fires in NOAA/AVHRR images. **International Journal of Remote Sensing**. 14(3):583-597.
- PIVELLO, V.; COUTINHO, L.M. 1992. Transfer of macro-nutrients to the atmosphere during experimental burnings in an open cerrado (Brazilian savanna). **Journal of Tropical Ecology**. 8(4):487-497.
- PIVELLO, V.R.; NORTON, G.A. 1996. FIRETOOL: an expert system for the use of prescribed fire in Brazilian savannas. **Journal of Applied Ecology**. 33:348-356.
- RAMOS NETO, M.B. 2000. **O Parque Nacional de Emas (GO) e o fogo: implicações para a conservação biológica**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- REATTO, A.; CORREIA, J.R.; SPERA, J.T. 1998. Solos do bioma Cerrado: aspectos pedológicos. In: **Cerrado: Ambiente e Flora**. Ed. S.M. Sano e S.P. Almeida. Planaltina: EMBRAPA/CPAC. p. 44-86.
- RIBEIRO, J.F.; WALTER, B.M.T. 1998. Fitofisionomias do Cerrado. In: **Cerrado: Ambiente e Flora**. Ed. S.M. Sano e S.P. Almeida, Planaltina: EMBRAPA/CPAC. p. 89-166.
- RONDE, C.; GOLDAMMER, J.G.; WADE, D.D.; SOARES, R.V. 1990. Prescribe fire in industrial plantations. In: **Fire in the tropical biota**. Ed. J.G Goldammer. Berlin: Springer-Verlag. p. 216-272.

- PALTRIDGE, G.W.; BARBER, J. 1988. Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA/AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**. 25:381-394.
- SALGADO-LABORIAU, M.L.; CASSETI, V.; FERRAZ-VICENTINI, K.R.; MARTIN, L.; SOUBIÈS, F.; SUGUIO, K.; TURCQ, B. 1997. Late quaternary vegetational and climatic changes in cerrado and palm swamp from Central Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology**. 128(1997):215-226.
- SISMANOGLU, R.A.; SETZER, A.; JUSTINO, F.B.; LIMA, W.F.A. 2002. Avaliação inicial do desempenho do risco de fogo gerado no CPTEC. **Anais**. 12^o Congresso Brasileiro de Meteorologia, 4-9/ agosto/2002, Foz do Iguaçu.
- SOARES, R.V. 1985. **Incêndios florestais - controle e uso do fogo**. FUPEF, Curitiba, 218p.
- TUCKER, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**. 8:127-150.
- TUCKER C.J.; SELLERS, P.J. 1986. Satellite remote sensing of primary production. **International Journal of Remote Sensing**. 7(11):1395-1416.
- TURNER, J.A.; LILLYWHITE, J.W.; PIESLAK, Z. 1961. **Forecasting for forest fire services**. Technical Note No. 42. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO).
- WARD, D.E.; SUSOTT, R.A.; KAUFFMAN, J.B.; BABBITT, R.E.; CUMMINGS, D.L.; DIAS, B.; HOLBEN, B.N.; KAUFMAN, Y.J.; RASMUSSEN, R.A.; SETZER, A.W. 1992. Smoke and fire characteristics for Cerrado and deforestation burns in Brazil: BASE-B experiment. **Journal of Geophysical Research**. 87(D13):14601-14619.

2 - SUSCEPTIBILIDADE DA VEGETAÇÃO DO CERRADO AO FOGO EM RELAÇÃO ÀS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

Resumo

Nos dias atuais, a principal causa de ocorrência de fogo no Cerrado é sua utilização por agropecuaristas na abertura de novas áreas de culturas e na limpeza e manejo de pastagens, principalmente no período de estiagem, quando as condições meteorológicas são propícias à combustão vegetal. As informações sobre estas condições são escassas para a vegetação do Cerrado. Este trabalho tem como objetivo avaliar a susceptibilidade da vegetação do Cerrado ao fogo em relação aos parâmetros meteorológicos associados à umidade da vegetação — precipitação, umidade relativa do ar e temperatura do ar — no período de maio a outubro/1998. Uma grade regular subdividiu a área de estudo em células com resolução espacial de 50 km. Os valores dos parâmetros meteorológicos nas células foram calculados por interpolação dos dados da rede de estações meteorológicas utilizada pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). A ocorrência de queimadas foi obtida pela sobreposição na grade regular dos focos de incêndios detectados pelo sensor ‘Advanced Very High Resolution Radiometer / National Oceanic and Atmospheric Administration’ - 12 (AVHRR/NOAA-12). As condições meteorológicas que ocorreram no percentil 95 das células com queimadas foram: precipitação inferior a 2 mm; precipitação acumulada de 5 dias consecutivos inferior a 25 mm; umidade relativa do ar inferior a 60%; temperatura do ar superior a 28°C; mais de um dia sem chuva antecedendo a queimada. Mais de 80% do Cerrado estavam susceptível a ocorrência de fogo, com os locais com e sem focos de queimadas apresentando as condições meteorológicas mínimas propícias à combustão da vegetação relatadas na literatura: precipitação inferior a 5 mm; precipitação acumulada de 5 dias inferior a 20 mm; umidade relativa do ar inferior a 60%; temperatura do ar superior a 25°C. Dessa forma, outros fatores — ação antrópica e disponibilidade de combustível vegetal — devem ser investigados quanto à sua importância na ocorrência de queimadas. Por outro lado, os parâmetros meteorológicos analisados mostraram diferenças estatisticamente significativas entre as áreas com e sem focos de queimadas, com nível de significância inferior a 0,01, com exceção do parâmetro ‘dias sem chuvas’. Estas diferenças mostraram que as queimadas ocorreram preferencialmente em condições meteorológicas de menor precipitação e umidade relativa do ar e maior temperatura do ar, quando comparado com as condições dos locais sem incidência de queimadas. Possivelmente esta diferença ocorreu porque a ação humana de iniciar o fogo se deu preferencialmente em condições meteorológicas mais extremas do que as mínimas propícias a queima vegetal, atitude que seria explicada pela necessidade de maior eficiência na queima do combustível vegetal e melhor propagação do fogo com a finalidade de atingir áreas extensas e eliminar quase toda vegetação seca.

2.1 - Introdução

Atualmente, apesar da utilização de modernas técnicas na agropecuária do Cerrado, ainda é mantida a prática de manejo antiga e barata baseada no uso do fogo para renovação e limpeza de pastagens, bem como para abertura e limpeza de áreas agrícolas (COUTINHO, 1990; 2000; MISTRY, 1998a; 1998b). É estimado que cerca de 20 a 30% do Cerrado são queimados

anualmente (COUTINHO, 1990; FRANÇA, 2000). Esta elevada incidência de queimadas tem sido relacionada com efeitos prejudiciais ao ambiente, tais como: redução da biodiversidade; erosão do solo pela sua maior exposição à chuva (ALHO & MARTINS, 1995; MUELLER-DUMBOIS & GOLDAMMER, 1990); empobrecimento do solo pela perda de nutrientes; poluição no âmbito local, como a causada pelo O₃, composto resultante de emissão de CO, hidrocarbonetos e NO_x; mudanças químicas na atmosfera global pela emissão de CO e CH₄; mudanças climáticas em escala regional e global decorrentes da emissão de CO₂ e CH₄ (principais gases responsáveis pelo efeito estufa), aerossóis e material particulado, que influenciam o balanço radiativo e hidrológico (CRUTZEN & ANDREAE, 1990; MUELLER-DUMBOIS & GOLDAMMER, 1990). Por outro lado, a completa supressão do fogo no Cerrado também acarreta efeitos ambientais, como a redução de biodiversidade e aumento da densidade de plantas lenhosas com alteração na composição florística e fisionômica da vegetação (PIVELLO & NORTON, 1996; MOREIRA, 1996).

Três condições simultâneas são necessárias para que uma queimada ocorra em vegetação: a) condições meteorológicas propícias; b) disponibilidade de combustível vegetal; c) existência de fonte de ignição. As condições meteorológicas da estação chuvosa no Cerrado propiciam o crescimento e acúmulo de fitomassa combustível, enquanto que as do período de estiagem secam a maior parte desse material, formado principalmente por gramíneas (OLIVEIRA, 1998; RAMOS NETO, 2000). Foi estimado que cerca de 70 a 75% da área queimada no Cerrado ocorrem no período seco (FRANÇA, 2000), sendo as atividades antrópicas ligadas a práticas agropecuárias sua principal causa (COUTINHO, 1990; 2000; MISTRY, 1998a; 1998b).

A umidade da vegetação tem relação direta com sua inflamabilidade (RONDE *et al.* 1990; CHUVIECO & MARTIN, 1994). Quando a umidade do combustível é inferior a 30% pode ocorrer a queima, sendo a condição ideal para o início e espalhamento de uma queimada quando é inferior a 7%. Com a umidade ao redor de 35%, a queima do combustível é ineficiente ou pode nem ocorrer (NOBLE *et al.*, 1980; RONDE *et al.*, 1990). Uma vez que medidas diretas da umidade do combustível vegetal são complexas e requerem custosas amostragens espaciais, parâmetros meteorológicos podem ser utilizados para estimá-la já que varia em função da precipitação, umidade relativa do ar, temperatura do ar e vento (CHUVIECO & MARTIN, 1994). De modo geral, ocorrência de precipitação e alta umidade relativa do ar diminuem a possibilidade de incêndios e vice-versa. Umidade do ar inferior a 30-40% é condição ótima para o início e espalhamento de um incêndio de difícil controle (TURNER *et al.*, 1961; RONDE *et al.*, 1990). Por outro lado, umidade do ar superior a 60%

pode impedir que a combustão de material vegetal seja sustentada (RONDE *et al.*, 1990). Uma chuva de 10 a 20 mm molha o solo e o combustível, impedindo sua queima no mesmo dia (SOARES, 1985; RONDE *et al.*, 1990). A temperatura do ar não é um fator limitante para a queima, mas valores acima de 25°C propiciam boas condições para a ocorrência de fogo (RONDE *et al.*, 1990), e quanto maior a temperatura mais provável uma fonte de ignição resultar em queimada (DEEMING *et al.*, 1974). MISTRY (1998) constatou que 72% dos fazendeiros pesquisados no Distrito Federal utilizaram indicadores climáticos para atear fogo à vegetação: altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar.

Os primeiros trabalhos sobre inflamabilidade da vegetação são do início do século passado e os primeiros índices de susceptibilidade ao fogo foram desenvolvidos na década de quarenta (TURNER *et al.* 1961). O conhecimento da susceptibilidade possibilita o planejamento de medidas preventivas, otimizando a alocação de recursos pela melhor relação custo/benefício, em comparação com as medidas supressivas (SOARES, 1985). Entre outras aplicações, os índices de susceptibilidade ao fogo podem ser utilizados no manejo da vegetação do Cerrado, principalmente para fins de conservação. Uma vez conhecido o grau de susceptibilidade numa região, poderiam ser emitidos alertas para as áreas onde ele é maior, incluindo aquelas destinadas à preservação e seu entorno, onde seriam tomadas medidas preventivas. Por outro lado, seriam localizadas as áreas de menor susceptibilidade, onde o uso do fogo controlado poderia ser autorizado.

2.2 - Objetivo

Informações sobre as condições meteorológicas de ocorrência de queimadas em vegetação no Cerrado são escassas. Este trabalho tem como objetivo avaliar a susceptibilidade da vegetação do Cerrado ao fogo em relação às condições meteorológicas. Dois objetivos específicos foram estabelecidos para essa avaliação: 1) determinar as condições meteorológicas nas quais ocorrem as queimadas na vegetação do Cerrado; 2) verificar as diferenças meteorológicas entre as áreas com e sem ocorrência de queimadas nessa vegetação.

Considerando três parâmetros meteorológicos — precipitação, umidade relativa do ar e temperatura do ar — é suposto que: menor precipitação e umidade relativa do ar e maior temperatura do ar aumentam a possibilidade de uma fonte de ignição resultar em fogo e vice-versa.

2.3 - Materiais e Método

2.3.1 - Área de estudo

A área de estudo foi a mesma utilizada por PEREIRA JR. (1992) e FRANÇA (2000), segundo interpretação do Mapa de Vegetação do Brasil produzido pelo INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA ([IBGE], 1993). Ela abrange a porção contínua da Região Fitoecológica do Cerrado definida como ‘Savana’ no Mapa de Vegetação, junto com as áreas de ‘Tensão Ecológica’, que indicam o contato entre Cerrado e outros tipos de vegetação. Enclaves de ‘Floresta’ ou Caatinga, definida como ‘Savana Estépica’, também estão incluídos. A área incluiu tanto as regiões de cobertura vegetal natural quanto as antropizadas. A área de estudo ocupa 2 200 000 km², cobrindo cerca de um quarto do território brasileiro, entre os paralelos 02°30’ S e 26°00’ S e os meridianos 41°45’ O e 62°00’ O, abrangendo a totalidade do Distrito Federal, a maior parte dos estados de Goiás, Tocantins e Mato Grosso do Sul, e parte dos estados de Mato Grosso, Maranhão, Piauí, Minas Gerais, Bahia, São Paulo, Paraná, Rondônia e Pará (Figura 2.1).

O clima predominante no Cerrado é tropical-quente-subúmido (Aw), caracterizado por forte sazonalidade das chuvas e estabilidade da temperatura média diária (DIAS, 1996). Devido à sua grande extensão o Cerrado apresenta uma significativa variabilidade climática regional. A precipitação anual média mostra tendência de aumento na direção Leste-Oeste, variando de 600 a 2000 mm, com oscilação entre 1000 e 1600 mm em 75% da área do Cerrado (ASSAD & EVANGELISTA, 1994). O período de estiagem, quando ocorre de 5 a 10% da precipitação, mostra variação temporal na direção Sudoeste-Nordeste, ocorrendo de maio a setembro nas regiões Sudoeste e Central do Cerrado e junho a novembro na Nordeste (CASTRO *et al.*, 1994). As temperaturas mais elevadas ocorrem durante a primavera-verão, com médias mensais de 26 a 30°C no Norte, 24 a 26°C nas áreas baixas do Centro e Sul, e 20 a 24°C nas regiões elevadas dos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Bahia e Minas Gerais. As médias mensais das temperaturas máximas variam de 30 a 36°C de Sul para Norte, podendo atingir valores diários ao redor de 40°C. No inverno, na maior parte do Cerrado, as médias mensais são superiores a 20°C, sendo acima de 24°C nos estados de Tocantins, Maranhão e Piauí e somente nas terras altas apresentam valores entre 15 e 20°C. As médias mensais das temperaturas mínimas variam de 12 a 16°C, de Sul para Norte do Cerrado, nas superfícies baixas, exceto nos estados de Maranhão e Piauí, e de 6 a 12°C nas áreas altas, podendo atingir em alguns locais valores diários ao redor de 0°C (NIMER & BRANDÃO, 1989).

A cobertura vegetal natural predominante da área de estudo é o Cerrado *lato sensu*, caracterizada por diferentes tipos fitofisionômicos que apresentam um gradiente de densidade de árvores, dispersas sobre um estrato herbáceo-arbustivo, geralmente formado por gramíneas. (COUTINHO, 1990; 2000; RIBEIRO & WALTER, 1998). As altitudes variam de 30 a mais de 1600 m, com 95% da área entre 300 e 900 m, onde o relevo varia de plano a suavemente ondulado com ocorrência de amplos planaltos, favorecendo a agricultura mecanizada e a irrigação (DIAS, 1996).

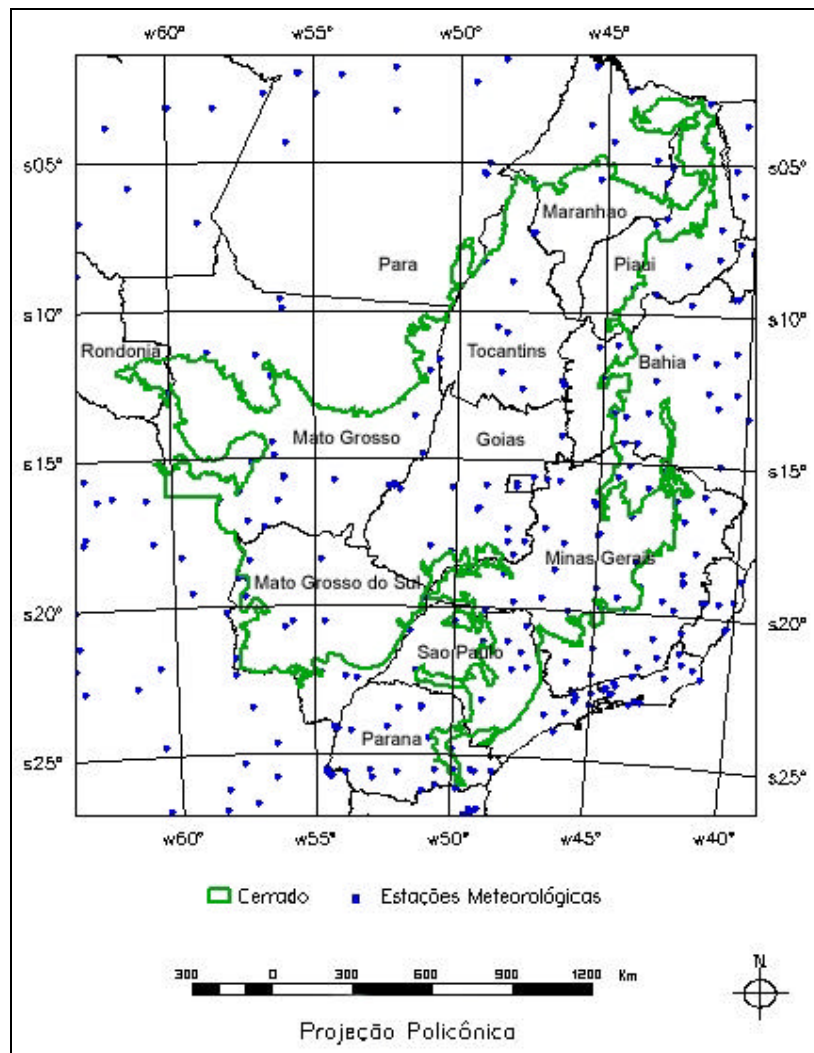


Figura 2.1 – Área de estudo com extensão de 2.200.000 km² de com as estações meteorológicas.

Fonte: adaptado de PEREIRA JR. (1992) e FRANÇA (2000).

2.3.2 - Materiais

Para processamento dos dados georreferenciados foi utilizado o Sistema de Informações Geográficas (SIG) SPRING 3.5 para ambiente Windows (CÂMARA et al., 1996; DIVISÃO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS / INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS [DPI/INPE], 2002).

Foram usados os dados diários das coordenadas geográficas dos focos de queimadas detectados no período de maio a outubro/1998 em imagens do canal 3 (3,7 μm , infravermelho termal) do sensor 'Advanced Very High Resolution Radiometer' (AVHRR) a bordo do satélite 'National Oceanic and Atmospheric Administration' - 12 (NOAA-12), passagem vespertina (21h30 GMT). Os dados foram gerados pela Divisão de Satélites Ambientais (DSA) do INPE, baseado no método descrito por PEREIRA (1987) e PEREIRA & SETZER (1993), com acurácia de 2 km conforme PEREIRA & SETZER (2001).

Os dados meteorológicos diários foram extraídos do banco de dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Este banco é composto por dados das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e das Plataformas de Coleta de Dados (PCD) do INPE, cujas localizações são mostradas na Figura 2.1. Foram utilizados os seguintes parâmetros no período de maio a outubro/1998: precipitação das últimas 24 horas, coletada às 12h00 GMT; umidade relativa e temperatura do ar, coletadas às 18h00 GMT.

2.3.3 - Método

2.3.3.1 - Processamento dos dados meteorológicos

Inicialmente, foi analisada a consistência dos dados meteorológicos, retirando-se os valores espúrios. Dessa forma, a umidade relativa do ar foi limitada ao intervalo de 0 a 100%, a temperatura do ar de -30 a $+60^{\circ}\text{C}$ e a precipitação diária de 0 a 500 mm.

Os dados selecionados foram incorporados ao SIG e interpolados pelo método da média ponderada pela distância, por quadrante, resultando em uma grade numérica regular diária para cada parâmetro meteorológico (DPI/INPE, 2002), com resolução espacial de 50 km, a mesma utilizada pelo "Joint Research Center" da Comunidade Européia (SAI, 2002). Isso significa que cada ponto da grade regular tem associado um valor para cada um dos parâmetros meteorológicos, representando assim, a condição em uma célula de 50 km x 50 km. Uma grade numérica regular meteorológica é mostrada na Figura 2.2a. Adicionalmente, foi calculado o número de dias consecutivos sem chuva, com base nos dados

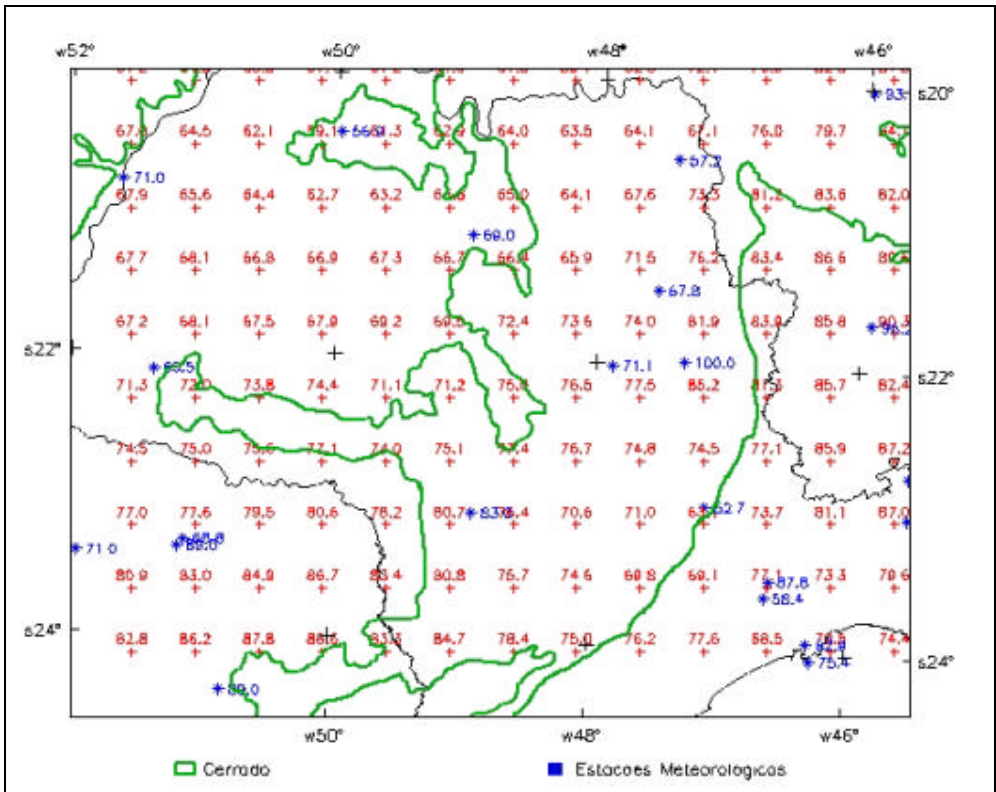
de precipitação, resultando em mais um parâmetro meteorológico para cada célula da grade. Neste cálculo, as precipitações de até 5 mm foram consideradas sem efeito sobre a contagem de dias (TURNER *et al.*, 1961).

2.3.3.2 - Processamento dos focos de queimadas

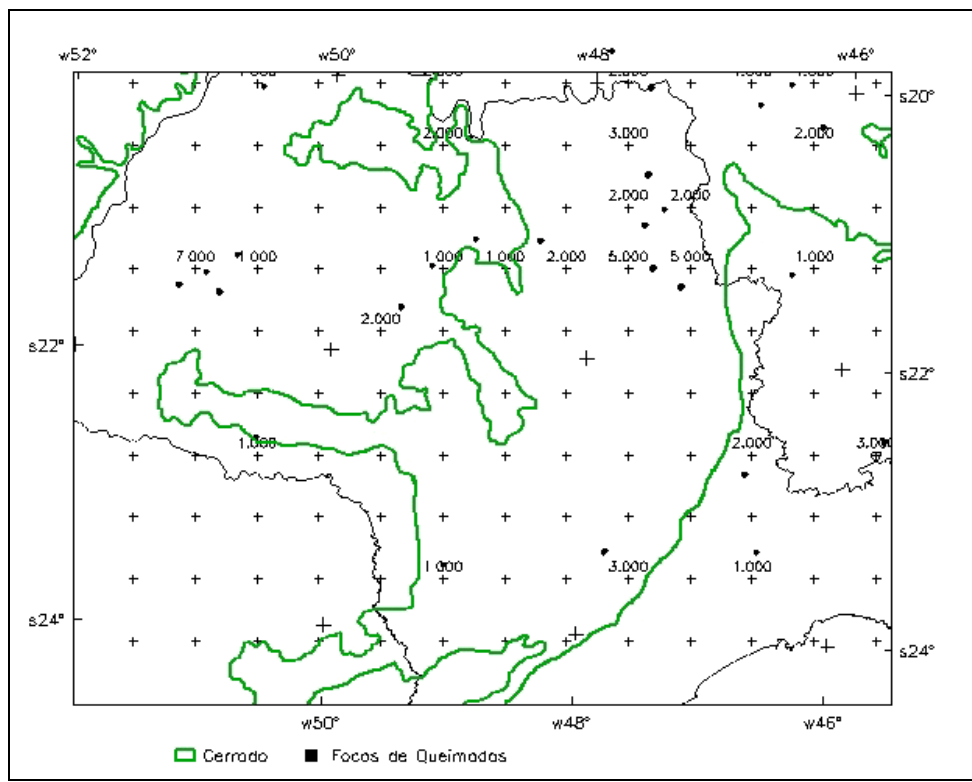
Os dados de localização dos focos de queimadas foram incorporados ao SIG e selecionados aqueles das passagens do NOAA-12 com maior recobrimento do Cerrado. Este procedimento resultou na seleção de dados de focos de queimadas de duas passagens orbitais por quinzena, totalizando 24 dias no período de maio a outubro/1998.. Para compatibilidade dos dados de focos com as grades de dados meteorológicos, foram geradas grades regulares diárias com resolução espacial de 50 km, com o número de focos de queimadas. Portanto, cada ponto da grade regular corresponde ao número de focos ocorridos dentro da célula de 50 km x 50 km. Uma grade numérica regular com o número de focos de queimadas é mostrada na Figura 2.2b. Os focos de queimadas foram considerados como verdade de campo em relação à incidência de queimadas em vegetação do Cerrado, indicando as regiões e as datas em que foram satisfeitas as três condições necessárias para a ocorrência de fogo.

2.3.3.3 - Sobreposição e análise dos dados

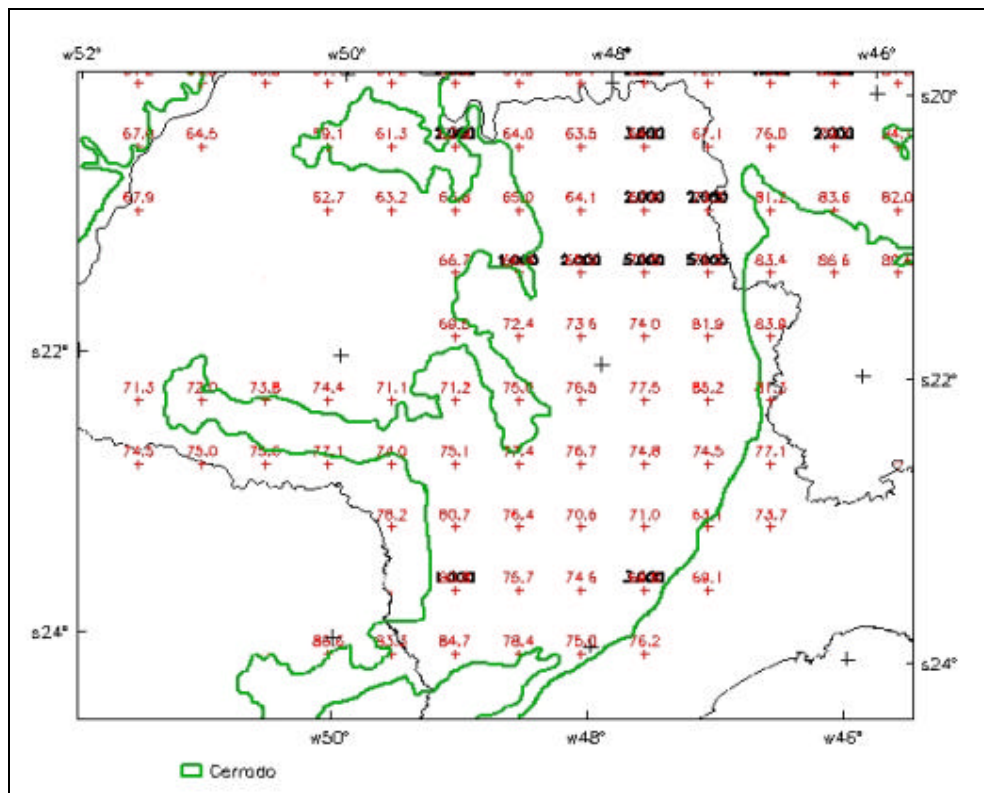
Para caracterizar as condições meteorológicas de ocorrência de fogo no Cerrado, as células das grades meteorológicas foram classificadas em dois grupos: com ocorrência de focos de queimadas e sem ocorrência de focos de queimadas. Isto foi feito com base na sobreposição da grade regular de focos de queimadas de um dia selecionado com as grades meteorológicas do mesmo dia. Este procedimento foi realizado para os 24 dias. Uma destas sobreposições está na Figura 2.2c. Posteriormente, foram realizados cálculos para: a) determinar as condições meteorológicas no conjunto de células com focos de queimadas; b) determinar as condições meteorológicas no conjunto de células sem focos de queimadas; c) verificar a existência de diferença entre eles. Neste último cálculo, foi aplicado o teste não-paramétrico U de Mann-Whitney (SIEGEL, 1977), para verificar a existência de diferença estatisticamente significativa entre os dois conjuntos.



a)



b)



c)

Figura 2.2 – Detalhe sobre a área do Cerrado no estado de São Paulo da: a) grade numérica regular da umidade relativa do ar às 18h GMT do dia 21/agosto/1998, junto com os dados das estações meteorológicas que deram origem à grade; b) grade numérica regular do número de focos de queimadas do dia 21/agosto/1998, junto com os focos; c) sobreposição das duas grades permitindo estimar as condições meteorológicas das células com e sem focos de queimadas.

2.4 - Resultados e Discussão

2.4.1 - Interpolações

Uma limitação geralmente associada com medidas meteorológicas é a baixa densidade dos pontos de coleta de dados, reduzindo a confiabilidade das interpolações (ASSAD & EVANGELISTA, 1994; CHUVIECO & MARTIN, 1994; FS, 2002). Segundo ASSAD & EVANGELISTA (1994) a rede de estações meteorológicas no Cerrado tem distribuição irregular, concentrada na região Centro-Sul, e baixa densidade, com cerca de 20 mil km²/estação. Neste trabalho, a densidade das estações meteorológicas foi de cerca de 14 mil km²/ estação, com dois terços deles localizados na região Centro-Sul. Esta densidade ainda é insuficiente, apesar de maior do que a anteriormente citada e com distribuição espacial também irregular. Por isso, a resolução espacial das interpolações foi limitada em 50 km, compatível com aquela utilizada pelo “Joint Research Center” da Comunidade Européia (SAI, 2002), mas inferior à resolução de 10 km utilizada no “National Fire Danger Rating System” dos EUA (FS, 2002).

2.4.2 - Condições meteorológicas na ocorrência de queimadas

Analisando os cinco parâmetros meteorológicos no conjunto de células com focos de queimadas no período de maio a outubro/1998, as queimadas ocorreram nas seguintes condições em 95% das células: a) precipitação diária inferior a 2 mm; b) precipitação acumulada de 5 dias inferior a 25 mm; c) umidade relativa do ar inferior a 60%; d) temperatura do ar superior a 28°C; e) mais de um dia sem chuva antecedendo a queimada. Estes valores estão dentro ou próximos dos limites das condições meteorológicas mínimas propícias à combustão vegetal relatadas na literatura, ou seja: a) precipitação inferior a 5 mm em 24 horas (adaptado de TURNER *et al.* (1961) e de SOARES (1985)); b) precipitação acumulada de 5 dias inferior à 20 mm (adaptado de Ronde *et al.* (1990)); c) umidade relativa do ar inferior a 60% (RONDE *et al.*, 1990); d) a temperatura do ar não é um fator limitante, mas temperatura superior a 25°C é mais propícia à queima vegetal (RONDE *et al.*, 1990).

Considerando as condições meteorológicas mínimas propícias à queima vegetal, segundo dados da literatura citados acima, foi constatado que elas ocorreram na maioria das células do Cerrado, tanto para aquelas com focos de queimadas quanto naquelas sem focos, nos conjuntos mensais e de todo o período de estudo (maio a outubro/1998). No período de estudo, 82% (16.704) das células do Cerrado apresentaram simultaneamente todas condições

meteorológicas mínimas (Tabela 2.1), o que ocorreu com 86% (2.499) das células com focos de queimadas (Tabela 2.2), e com 81% (14.205) das células sem focos de queimadas (Tabela 2.3). Analisando os dados mensais, o menor valor percentual de células do Cerrado com as condições meteorológicas mínimas foi 64% em outubro e o maior 94% em julho (Tabela 2.1); nas células com focos de queimadas o menor foi 75% em maio e o maior 93% em setembro (Tabela 2.2); nas células sem focos de queimadas o menor foi 61% em outubro e o maior 94% em julho (Tabela 2.3). Portanto, foi constatado que as condições meteorológicas mínimas propícias à ocorrência de fogo em vegetação existiram na maioria das células dos conjuntos mensais.

Tabela 2.1 – Células do Cerrado que satisfazem simultaneamente as condições meteorológicas mínimas propícias às queimadas*, no período de maio a outubro/1998.

Mês – Dias	Células do Cerrado		
	número (a)	Propícias às queimadas	
		número (b)	% (b/a x 100)
Mai. – 08, 13, 22, 26	3.412	2.628	77%
Jun. – 04, 09, 18, 22	3.412	2.954	87%
Jul. – 01, 06, 20, 29	3.412	3.201	94%
Ago. – 03, 12, 16, 21	3.412	2.714	80%
Set. – 03, 12, 17, 26	3.412	3.032	89%
Out. – 01, 05, 19, 23	3.412	2.175	64%
Mai a Outubro	20.472	16.704	82%

* Condições meteorológicas propícias às queimadas: precipitação diária < 5 mm; precipitação acumulada de 5 dias < 20 mm; umidade relativa do ar < 60%; temperatura do ar > 25°C.

Tabela 2.2 – Células do Cerrado com focos de queimadas que satisfazem simultaneamente as condições meteorológicas mínimas propícias às queimadas*, no período de maio a outubro/1998.

Mês – Dias	Células do Cerrado	Células do Cerrado <u>com</u> focos de queimadas			
	número (a)	número (b)	Propícias às queimadas		
			número (c)	% (c/a x 100)	% (c/b x 100)
Mai. – 08, 13, 22, 26	3.412	69	52	2%	75%
Jun. – 04, 09, 18, 22	3.412	191	150	4%	79%
Jul. – 01, 06, 20, 29	3.412	330	297	9%	90%
Ago. – 03, 12, 16, 21	3.412	645	537	16%	83%
Set. – 03, 12, 17, 26	3.412	1.045	969	28%	93%
Out. – 01, 05, 19, 23	3.412	634	494	14%	78%
Mai a Outubro	20.472	2.914	2.499	12%	86%

* Condições meteorológicas propícias às queimadas: precipitação diária < 5 mm; precipitação acumulada de 5 dias < 20 mm; umidade relativa do ar < 60%; temperatura do ar > 25°C.

Tabela 2.3 – Células do Cerrado sem focos de queimadas que satisfazem simultaneamente as condições meteorológicas mínimas propícias às queimadas*, no período de maio a outubro/1998.

Mês – Dias	Células do Cerrado	Células do Cerrado <u>sem</u> focos de queimadas			
	número (a)	número (b)	Propícias às queimadas		
			número (c)	% (c/a x 100)	% (c/b x 100)
Mai. – 08, 13, 22, 26	3.412	3.343	2.576	75%	77%
Jun. – 04, 09, 18, 22	3.412	3.221	2.804	82%	87%
Jul. – 01, 06, 20, 29	3.412	3.082	2.904	85%	94%
Ago. – 03, 12, 16, 21	3.412	2.767	2.177	64%	79%
Set. – 03, 12, 17, 26	3.412	2.367	2.063	60%	87%
Out. – 01, 05, 19, 23	3.412	2.778	1.681	49%	61%
Maio a Outubro	20.472	17.558	14.205	69%	81%

* Condições meteorológicas propícias às queimadas: precipitação diária < 5 mm; precipitação acumulada de 5 dias < 20 mm; umidade relativa do ar < 60%; temperatura do ar > 25°C.

Os valores médios dos parâmetros meteorológicos corroboram esses resultados, pois estavam dentro das condições mínimas propícias às queimadas, tanto para o conjunto de células com focos de queimadas quanto para aquele sem focos, nos conjuntos mensais e em todo o período de estudo (Tabela 2.4). As médias encontradas no período de maio a outubro/1998 foram: a) precipitação diária de 0,3 mm para o conjunto de células com focos de queimadas e 0,6 mm para o conjunto sem focos; b) precipitação acumulada de 5 dias de 4,3 mm para o conjunto com focos de queimadas e 5,3 mm para o conjunto sem focos; c) umidade relativa do ar de 39,7% para o conjunto com focos de queimadas e 43,9% para o conjunto sem focos; d) temperatura do ar de 34,7°C para o conjunto com focos de queimadas e 31,7°C para o conjunto sem focos; e) 14,9 dias sem chuva para o conjunto com focos de queimadas e 18,1 para o conjunto sem focos de queimadas.

Tabela 2.4 – Valores médios mensais para os parâmetros meteorológicos, nas células do Cerrado com e sem focos de queimadas, para o período de maio-outubro/1998.

Mês - Dias	Dias sem chuva		Precipitação Diária (mm)		Precipitação Acumulada de 5 dias (mm)		Umidade Relativa do Ar – Diária 18Z (%)		Temperatura do Ar – Diária 18Z (°C)	
	Com focos	Sem focos	Com focos	Sem focos	Com focos	Sem focos	Com focos	Sem focos	Com focos	Sem focos
Maio	9,0	11,4	0,5	1,1	6,9	4,7	45,7	49,0	29,8	30,8
Junho	22,6	19,5	0,0	0,0	0,8	2,3	44,9	44,7	30,4	30,2
Julho	40,0	37,7	1,2	0,3	1,8	0,7	35,3	37,7	32,5	31,7
Agosto	16,2	19,8	0,1	0,4	0,8	5,6	45,6	45,3	35,4	32,7
Setembro	11,8	11,5	0,2	0,6	3,8	4,4	36,5	38,9	35,2	33,3
Outubro	8,7	6,6	0,3	1,5	10,9	15,1	38,5	46,7	35,0	32,2
Maio a Outubro	14,9	18,1	0,3	0,6	4,3	5,3	39,7	43,9	34,7	31,7

Obs.: foram analisadas 3.412 células por mês e 20.472 de maio a outubro.

Para a porcentagem acumulada de 95% das células os valores dos parâmetros meteorológicos também foram similares aos das condições mínimas propícias ao fogo, tanto para o conjunto de células com focos de queimadas quanto para aquele sem focos. Os valores encontrados foram: a) entre zero e 5 mm de precipitação diária, tanto para o conjunto de células com focos de queimadas quanto para o sem focos de queimadas (Tabela 2.5 e Figura 2.3); b) entre zero e 30 mm de precipitação acumulada de 5 dias, tanto para o conjunto de células com focos de queimadas quanto para o sem focos de queimadas (Tabela 2.6 e Figura 2.4); c) entre 20 e 60% de umidade relativa do ar para o conjunto de células com focos de queimadas (Tabela 2.7 e Figura 2.5a), e entre 20 e 70% de umidade relativa do ar para o conjunto sem focos de queimadas (Tabela 2.7 e Figura 2.5b); d) temperatura do ar entre 28 e 40°C para o conjunto de células com focos de queimadas (Tabela 2.8 e Figura 2.6a) e entre 24 e 38°C para o conjunto sem focos de queimadas (Tabela 2.8 e Figura 2.6b); e) entre um e 100 dias sem chuva tanto para o conjunto de células com focos de queimadas quanto para o sem focos de queimadas (Tabela 2.9 e Figura 2.7).

RAMOS NETO (2000) mostrou em estudo no Parque Nacional de Emas que não é necessário existir um período de estiagem para a ocorrência de uma queimada. Isto concorda com as observações de ocorrências de queimadas após um dia sem chuva. Possivelmente, isso decorreu do combustível vegetal morto ter rápida resposta às condições meteorológicas, podendo estar seco em poucas horas após a ocorrência de uma chuva.

Esses resultados mostram que as condições meteorológicas mínimas propícias para ocorrência de queimadas, segundo os dados de literatura, estavam presentes na maior parte do Cerrado, no período de maio a outubro/1998. Portanto, a maioria do Cerrado estava susceptível a ocorrência de fogo.

Os valores médios dos parâmetros meteorológicos no período de maio a outubro/1998 (Tabela 2.4), evidenciam que ocorreram diferenças entre as condições meteorológicas dos conjuntos de células com e sem focos de queimadas. Áreas com focos de queimadas apresentam menor precipitação e umidade relativa do ar e maior temperatura do ar que as áreas sem focos de queimadas, de modo similar a estudos realizados anteriormente (TURNER *et al.*, 1961; DEEMING *et al.*, 1974; SOARES, 1985; RONDE *et al.*, 1990). As diferenças foram confirmadas estatisticamente com a aplicação do teste não-paramétrico U de Mann-Whitney (Tabela 2.10), com os dados no período de maio a outubro/1998 mostrando diferença com nível de significância inferior a 0,01 para todos os parâmetros meteorológicos, exceto para o parâmetro dias sem chuva, que não mostrou diferença significativa.

Sem levar em consideração o parâmetro dias sem chuvas, os dados meteorológicos mensais dos meses de agosto a outubro mostraram diferenças com nível de significância de 0,001 entre o conjunto de células com e sem focos de queimadas para todos os parâmetros meteorológicos, exceto precipitação acumulada de 5 dias em setembro e umidade relativa do ar em agosto, que não apresentaram diferença (Tabela 2.10). Nos meses de maio a julho apenas alguns parâmetros apresentaram diferença significativa abaixo do nível de significância de 0,001: temperatura e umidade relativa do ar em julho, e precipitação acumulada de 5 dias em junho (Tabela 2.10). O parâmetro dias sem chuvas mostrou diferença significativa em todos os meses, contrastando com o resultado para todo o período de estudo que não apresenta diferença. Mas os dados mensais não mostram um padrão definido de maior número de dias sem chuva em células com focos de queimadas, podendo ser esta a causa de não ocorrer diferença no conjunto de células de todo o período de estudo.

Esses resultados indicariam que, apesar da ocorrência das condições meteorológicas mínimas para queima da vegetação na maior parte do Cerrado no período de maio a outubro/1998, as queimadas no período de maio a julho teriam características diversas daquelas no período de agosto a outubro. No primeiro período elas seriam realizadas pelos fazendeiros nas condições mínimas propícias à queima, possibilitando um melhor controle do fogo e conseqüentemente da área queimada. No segundo período, no qual foram verificadas 80% das células com focos de incêndios, as queimadas ocorreriam em condições meteorológicas mais extremas do que as mínimas requeridas para queima da vegetação. Esta atitude dos fazendeiros seria explicada pela necessidade de maior eficiência na combustão da vegetação e melhor propagação do fogo com a finalidade de atingir áreas maiores e eliminar quase toda vegetação seca. Esses resultados concordam com os obtidos por MISTRY (1998b) que, ao entrevistar 40 fazendeiros do Distrito Federal sobre o uso do fogo, constatou que 86% deles escolheram do meio para o final da estação seca como época para realização das queimadas e que 72% dos utilizaram indicadores climáticos para atear fogo à vegetação, selecionando os dias com altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar.

Tabela 2.5 – **Precipitação diária** para as células do Cerrado com e sem focos de queimadas, no período de maio a outubro/1998.

Precipitação Diária (mm)	Células do Cerrado com focos de queimadas			Células do Cerrado sem focos de queimadas		
	Número	%	% Acumulada	Número	%	% Acumulada
0-5	2853	98%	98%	16874	96%	96%
5-10	41	1%	99%	391	2%	98%
10-15	13	0%	100%	154	1%	99%
15-20	4	0%	100%	67	0%	100%
20-50	3	0%	100%	72	0%	100%

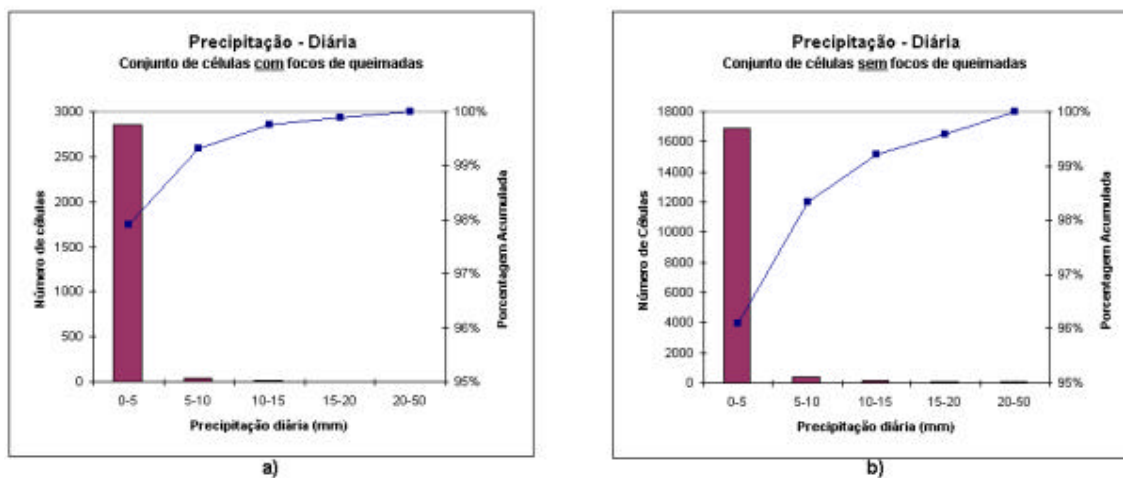
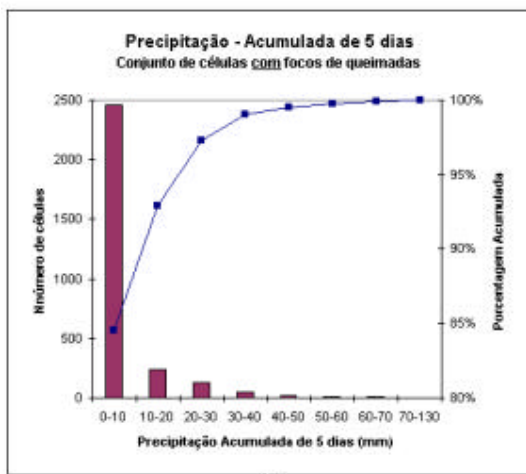


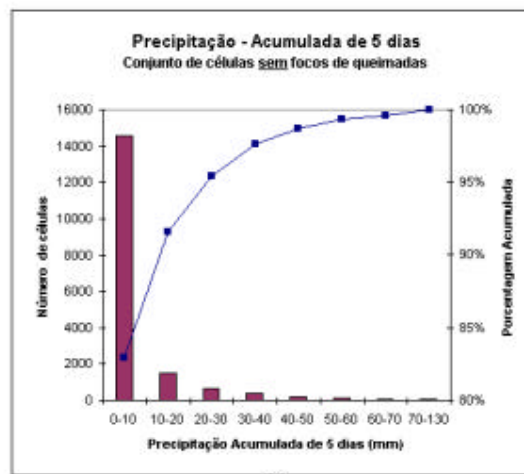
Figura 2.3 – Número e porcentagem acumulada de células do Cerrado: a) com focos de queimadas, em um total de 2.914 células; b) sem focos de queimadas, em um total de 17.558 células, para o parâmetro meteorológico **precipitação diária**. Foram analisadas 20.472 células no Cerrado no período de maio a outubro /1998.

Tabela 2.6 – **Precipitação acumulada de 5 dias** para as células do Cerrado com e sem focos de queimadas, no período de maio a outubro/1998.

Precipitação Acumulada de 5 dias (mm)	Células do Cerrado com focos de queimadas			Células do Cerrado sem focos de queimadas		
	Número	%	% Acumulada	Número	%	% Acumulada
0-10	2463	85%	85%	14565	83%	83%
10-20	244	8%	93%	1512	9%	92%
20-30	128	4%	97%	679	4%	95%
30-40	50	2%	99%	381	2%	98%
40-50	15	1%	100%	196	1%	99%
50-60	6	0%	100%	106	1%	99%
60-70	5	0%	100%	53	0%	100%
70-130	3	0%	100%	66	0%	100%



a)

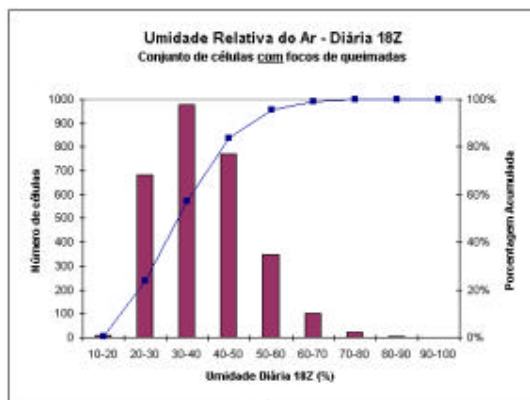


b)

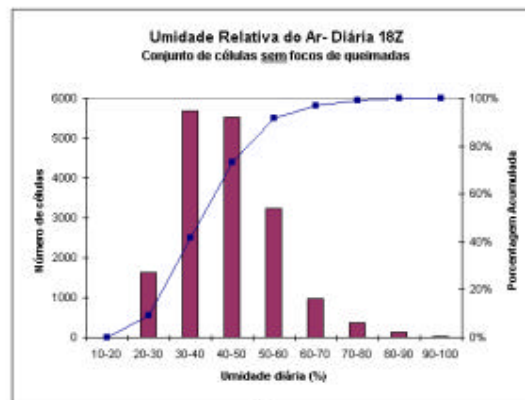
Figura 2.4 – Número e porcentagem acumulada de células do Cerrado: a) com focos de queimadas, em um total de 2.914 células; b) sem focos de queimadas, em um total de 17.558 células, para o parâmetro meteorológico **precipitação acumulada de 5 dias**. Foram analisadas 20.472 células no Cerrado no período de maio a outubro /1998.

Tabela 2.7 – **Umidade relativa do ar** às 18h GMT para as células do Cerrado com e sem focos de queimadas, no período de maio a outubro/1998.

Umidade Diária 18Z (%)	Células do Cerrado com focos de queimadas			Células do Cerrado sem focos de queimadas		
	Número	%	% Acumulada	Número	%	% Acumulada
10-20	9	9	0%	6	0%	0%
20-30	682	682	24%	1643	9%	9%
30-40	978	978	57%	5683	32%	42%
40-50	769	769	84%	5516	31%	73%
50-60	348	348	96%	3235	18%	92%
60-70	102	102	99%	964	5%	97%
70-80	22	22	100%	359	2%	99%
80-90	4	4	100%	128	1%	100%
90-100	0	0	100%	24	0%	100%



a)



b)

Figura 2.5 – Número e porcentagem acumulada de células do Cerrado: a) com focos de queimadas, em um total de 2.914 células; b) sem focos de queimadas, em um total de 17.558 células, para o parâmetro meteorológico **umidade relativa do ar** às 18h GMT. Foram analisadas 20.472 células no Cerrado no período de maio a outubro /1998.

Tabela 2.8 – **Temperatura do ar** às 18h GMT para as células do Cerrado com e sem focos de queimadas, no período de maio a outubro/1998.

Temperatura Diária 18Z (°C)	Células do Cerrado com focos de queimadas			Células do Cerrado sem focos de queimadas		
	Número	%	% Acumulada	Número	%	% Acumulada
40-38	20	1%	1%	17	0%	0%
38-36	775	27%	27%	995	6%	6%
36-34	952	33%	60%	3721	21%	27%
34-32	564	19%	79%	4692	27%	54%
32-30	282	10%	89%	3479	20%	73%
30-28	168	6%	95%	2285	13%	87%
28-26	70	2%	97%	1203	7%	93%
26-24	48	2%	99%	656	4%	97%
24-22	29	1%	100%	309	2%	99%
22-20	5	0%	100%	136	1%	100%
20-12	1	0%	100%	65	0%	100%

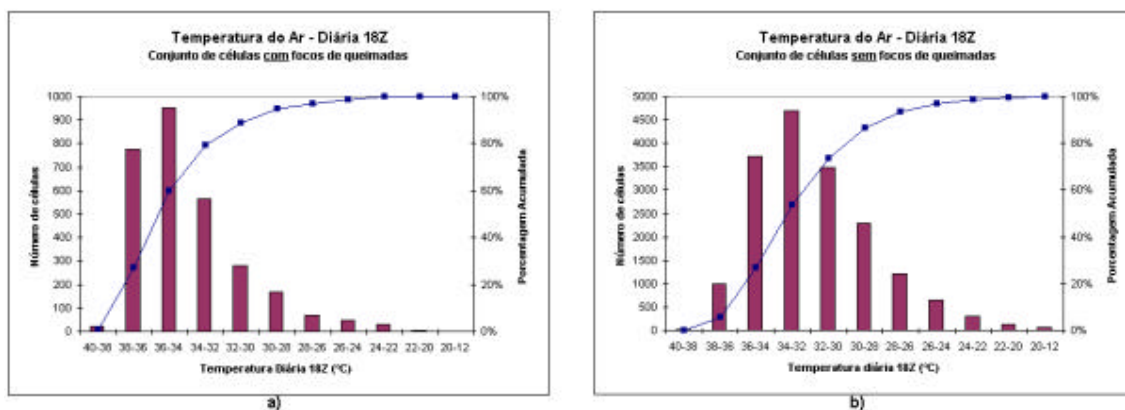


Figura 2.6 – Número e porcentagem acumulada de células do Cerrado: a) com focos de queimadas, em um total de 2.914 células; b) sem focos de queimadas, em um total de 17.558 células, para o parâmetro meteorológico **temperatura do ar** às 18h GMT. Foram analisadas 20.472 células no Cerrado no período de maio a outubro /1998.

Tabela 2.9 – **Dias consecutivos sem chuva** para as células do Cerrado com e sem focos de queimadas, no período de maio a outubro/1998.

Dias sem Chuva	Células do Cerrado com focos de queimadas			Células do Cerrado sem focos de queimadas		
	Número	%	% Acumulada	Número	%	% Acumulada
130-100	5	0%	0%	36	0%	0%
100-90	10	0%	1%	66	1%	1%
90-80	28	1%	1%	186	1%	2%
80-70	35	1%	3%	256	1%	3%
70-60	40	1%	4%	375	2%	5%
60-50	71	2%	6%	631	4%	9%
50-40	61	2%	9%	656	4%	13%
40-30	123	4%	13%	1106	6%	19%
30-20	379	13%	26%	1844	11%	29%
20-10	804	28%	53%	3708	21%	50%
10-5	655	22%	76%	3868	22%	73%
5-1	486	17%	93%	3191	18%	91%
1	157	5%	98%	940	5%	96%
0	60	2%	100%	694	4%	100%

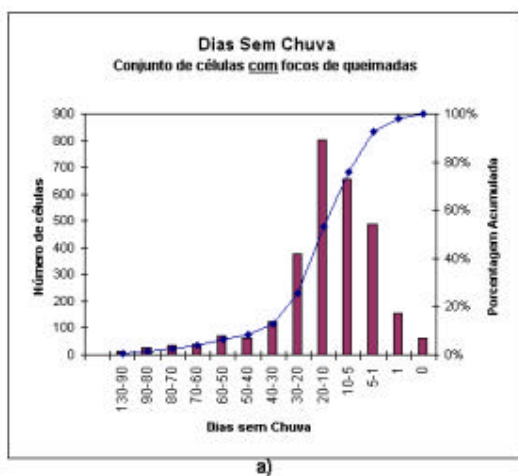


Figura 2.7 – Número e porcentagem acumulada de células do Cerrado: a) com focos de queimadas, em um total de 2.914 células; b) sem focos de queimadas, em um total de 17.558 células, para o parâmetro meteorológico **dias consecutivos sem chuva**. Foram analisadas 20.472 células no Cerrado no período de maio a outubro /1998.

Tabela 2.10 – Resultado da aplicação do teste U de Mann-Whitney para os dados meteorológicos mensais do conjunto de células do Cerrado com e sem focos de queimadas, no período de maio a outubro/1998.

Data - Dias	Dias sem chuva		Precipitação Diária (mm)		Precipitação Acumulada de 5 dias (mm)		Umidade Relativa Ar Diária 18Z (%)		Temperatura do Ar Diária 18Z (°C)	
	z	prob. z	z	prob. z	z	prob. z	z	prob. z	Z	prob. z
Maio	-2,16	0,015*	-1,75	0,040*	-0,12	0,451	-2,05	0,020*	-2,35	0,010**
Junho	-1,87	0,030*	-0,56	0,289	-3,38	0,000***	-0,79	0,216	-1,08	0,140
Julho	-2,89	0,002**	-1,23	0,110	-0,02	0,492	-4,10	0,000***	-3,63	0,000***
Agosto	-6,07	0,000***	-4,69	0,000***	-11,82	0,000***	-0,29	0,386	-14,41	0,000***
Setembro	-2,72	0,003**	-3,77	0,000***	-1,42	0,077	-9,34	0,000***	-17,40	0,000***
Outubro	-3,20	0,001***	-10,57	0,000***	-4,43	0,000***	-14,15	0,000***	-15,45	0,000***
Maio a Outubro	-0,98	0,164	-4,69	0,000***	-11,82	0,004**	-0,29	0,000***	-14,41	0,000***

Obs.: * significa que existe diferença entre os dados com e sem focos de queimadas com nível de significância de 0,05, ** com 0,01 e *** com 0,001; foram analisadas 3.412 células por mês e 20.472 de maio a outubro.

2.5 - Conclusões

Foram determinadas as condições meteorológicas que ocorreram em 95% das células com queimadas no Cerrado, no período de maio a outubro/1998: a) precipitação inferior a 2 mm; b) precipitação acumulada em 5 dias inferior a 25 mm; c) umidade relativa do ar inferior a 60%; d) temperatura do ar superior a 28°C; e) mais que um dia sem chuva antecedendo a queimada.

Os resultados mostram que no período estudado, de modo geral, tanto os locais com focos de queimadas quanto os sem focos apresentaram condições meteorológicas mínimas propícias à combustão da vegetação, semelhantes às relatadas na literatura. Ou seja, a maior parte do Cerrado estava susceptível a ocorrência de fogo, considerando o fator meteorológico. Portanto, deve ser averiguado se os outros fatores necessários para queima da vegetação — ação antrópica e disponibilidade de combustível vegetal — tiveram um papel mais importante na ocorrência de queimadas do que as condições meteorológicas.

Por outro lado, apesar da existência de condições meteorológicas mínimas propícias à combustão da vegetação em quase todo Cerrado, a maioria dos focos de queimadas ocorreu preferencialmente em regiões com menor umidade relativa do ar e maior temperatura do ar, quando comparado com as condições dos locais sem incidência de focos de fogo. A diferença entre as condições meteorológicas do conjunto de células com focos de queimadas e aquelas do conjunto sem focos foi confirmada estatisticamente com nível de significância inferior a 0,01. Possivelmente, esta diferença ocorreu porque a ação humana de iniciar o fogo foi realizada preferencialmente em condições meteorológicas mais extremas do que as mínimas propícias à queima vegetal. Esta atitude dos fazendeiros seria explicada pela necessidade de maior eficiência na queima do combustível vegetal e de melhor propagação do fogo para

atingir áreas extensas e eliminar quase toda vegetação seca. Esta informação deve ser mais estudada para confirmar se as condições meteorológicas de ocorrência das queimadas encontradas neste trabalho são similares às condições meteorológicas que os fazendeiros utilizam para iniciar o fogo. Essa é uma informação a ser utilizada na prevenção de queimadas.

As condições meteorológicas mínimas propícias à combustão da vegetação aqui utilizadas são as relatadas na literatura. Estudos específicos deverão ser realizados para determinar essas condições para o Cerrado e verificar se coincidem com as da literatura. Para obter essa informação, seria utilizado o método deste trabalho ao longo de um período anual, abrangendo a estação chuvosa e a seca. As condições meteorológicas mínimas para ocorrência de queimadas no Cerrado seriam encontradas nos períodos de transição da estação chuvosa para a estação seca e da estação seca para a chuvosa.

Referências

- ALHO, C.J.R.; MARTINS, E.S. 1995. **De grão em grão, o Cerrado perde espaço - Cerrado: impactos do processo de ocupação**. Brasília: Fundo Mundial para a Natureza (WWF).
- ASSAD, E.D.; EVANGELISTA, B.A. 1994. Análise freqüencial da precipitação pluviométrica. In: **Chuva no Cerrado: análise e espacialização**. Ed. E.D. Assad. Brasília: EMBRAPA-CPAC. p. 25-42.
- CÂMARA, G., SOUZA, R.C.M., FREITAS, U.M., GARRIDO, J., II, F.M. 1996. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. **Computers & Graphics**. 20(3):395-403.
- CASTRO, L.H.R.; MOREIRA, A.M.; ASSAD, E.D. 1994. Definição e regionalização dos padrões pluviométricos dos Cerrados brasileiros. In: **Chuva no Cerrado: análise e espacialização**. Ed. E.D. Assad. Brasília: EMBRAPA-CPAC. p. 13-23.
- CHUVIECO, E.; MARTIN, M.P. 1994. Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. 60(5):563-570.
- COUTINHO, L.M. 1990. Fire in the ecology of the Brazilian cerrado. In: **Fire in the tropical biota**. Ed. J.G. Goldammer. New York: Springer-Verlag. p. 82-105.
- COUTINHO, L.M. 2000. **Cerrado**. Disponível em: <<http://eco.ib.usp.br/cerrado>>. Acesso em agosto/2002.

- CRUTZEN, P.J.; ANDREAE, M. O. 1990. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**. 250:1669-1678.
- DEEMING, J.E.; LANCASTER, J.W.; FOSBERG, M.A.; FURMAN, R.W.; SCHROEDER, M.J. 1974. **The national fire-danger rating system**. USDA Forest Service Researcher Paper RM-84. Fort Collins: Rocky Mountain Forest and Range Exp. Stn.
- DIAS, B.F.S. 1996. Cerrados: uma caracterização. In: **Alternativas de desenvolvimento dos cerrados: manejo e conservação dos recursos naturais renováveis**. Ed. B.F.S. Dias. Brasília: Fundação Pró-Natureza (FUNATURA). p. 11-25.
- DIVISÃO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS / INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (DPI/INPE). 2002. **SPRING**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring>>. Acesso em maio/2002.
- FOREST SERVICE (FS). 2002. **Wildland Fire Assessment System**. Disponível em: <<http://www.fs.fed.us/land/wfas>>. Acesso em agosto/2002.
- FRANÇA, H. 2000. **Metodologia de identificação e quantificação de áreas queimadas no Cerrado com imagens AVHRR/NOAA**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 1993. **Mapa de Vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE. Escala 1:5.000.000.
- MOREIRA, A. 1996. Proteção contra o fogo e seu efeito na distribuição e composição de espécies de cinco fisionomias de cerrado. In: **Impactos de queimadas em áreas de cerrado e restinga**. Ed. H.S.Miranda, C.H.Saito, B.F.S.Dias. Brasília: ECL/UnB. p 112-121.
- NIMER, E.; BRANDÃO, A.M.P.M. 1989. **Balço hídrico e clima da Região dos Cerrados**. Rio de Janeiro: IBGE.
- NOBLE, I.R.; BARY, G.A.V.; GILL, A.M. 1980. McArthur's fire-danger meters expressed as equations. **Australian Journal of Ecology**. 5:201-203.
- MISTRY, J. 1998a. Fire in the cerrado (savannas) of Brazil: an ecological review. **Progress in Physical Geography**. 22(4):425-448.
- MISTRY, J. 1998b. Decision-making for fire use among farmers in savannas: an exploratory study in the Distrito Federal, central Brazil. **Journal of Environmental Management**. 54:321-334.

- MUELLER-DUMBOIS, D.; GOLDAMMER, J.G. 1990. Fire in the tropical ecosystems and global environmental change: an introduction. In: **Fire in the tropical biota**. Ed. J.G. Goldammer. New York: Springer-Verlag. p. 1-10.
- OLIVEIRA, P.E. 1998. Fenologia e biologia reprodutiva das espécies de Cerrado. In: **Cerrado: Ambiente e Flora**. Ed. S.M. Sano e S.P. Almeida. Planaltina: EMBRAPA/CPAC. p.169-192.
- PEREIRA JR., A. C. 1992. **Monitoramento de queimadas na região dos Cerrados com utilização de dados AVHRR/NOAA corrigidos com dados TM/Landsat**. Dissertação (Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos. (INPE-5490-TDI/507).
- PEREIRA, J.A.R.; SETZER, A. 2001. Brazilian Validation of AVHRR fire pixels. In: **Global and regional vegetation fire monitoring from space: planning a coordinated international effort**. Ed. F. Ahern, J.G. Goldammer, C. Justice. Netherlands: Academic Publishing.
- PEREIRA, M.C. 1987. **Detecção, monitoramento e análise de alguns efeitos ambientais de queimadas na Amazônia através da utilização de imagens dos satélites NOAA e Landsat, e dados de aeronave**. Dissertação (Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos. (INPE-4503-TDL/326).
- PEREIRA, M.C.; SETZER, A.W. 1993. Spectral characteristics of deforestation fires in NOAA/AVHRR images. **International Journal of Remote Sensing**. 14(3):583-597.
- PIVELLO, V.R.; NORTON, G.A. 1996. FIRETOOL: an expert system for the use of prescribed fire in Brazilian savannas. **Journal of Applied Ecology**. 33:348-356.
- RAMOS NETO, M.B. 2000. **O Parque Nacional de Emas (GO) e o fogo: implicações para a conservação biológica**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.
- RIBEIRO, J.F.; WALTER, B.M.T. 1998. Fitofisionomias do Cerrado. In: **Cerrado: Ambiente e Flora**. Ed. S.M. Sano e S.P. Almeida. Planaltina: EMBRAPA/CPAC. p. 87-166.
- RONDE, C.; GOLDAMMER, J.G.; WADE, D.D.; SOARES, R.V. 1990. Prescribe fire in industrial plantations. In: **Fire in the tropical biota**. Ed. J.G. Goldammer, Berlin: Springer-Verlag. p. 216-272.
- SIEGEL, S. 1977. **Estatística não-paramétrica (para ciências do comportamento)**. São Paulo: McGraw-Hill.

SOARES, R.V. 1985. **Incêndios florestais – controle e uso do fogo**. Curitiba: FUPEF.

SPACE APPLICATION INSTITUTE (SAI). 2002. **Meteorological fire risk evolution**.

Disponível em: <<http://natural-hazards.jrc.it/fires/risk/dynamic/meteo.html>>. Acesso em junho/2002.

TURNER, J.A.; LILLYWHITE, J.W.; PIESLAK, Z. 1961. **Forecasting for forest fire services**. Technical Note No.42. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO).

3 - CLASSIFICAÇÃO DA VEGETAÇÃO DO CERRADO QUANTO À SUSCEPTIBILIDADE AO FOGO COM O USO DE IMAGENS AVHRR/NOAA

Resumo

Milhares de queimadas são registrados anualmente nos cerca de 2,2 milhões de km² do Cerrado. Mais de 75% dessas queimadas ocorrem durante a estação seca e tem origem antrópica. Foi desenvolvido um método para classificar a cobertura vegetal do Cerrado quanto à susceptibilidade ao fogo com o uso de mosaicos quinzenais do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (IVDN) e do canal3 (3,7µm), gerados de imagens do sensor 'Advanced Very High Resolution Radiometer / National Oceanic and Atmospheric Administration' - 14 (AVHRR/NOAA-14). Os resultados indicaram a existência de sete classes de cobertura vegetal nos mosaicos, cujas ocorrências foram espacializadas em mapas quinzenais gerados por meio de um algoritmo estruturado em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), no período de maio a outubro/98. Para cada classe de cobertura vegetal foi atribuído um grau de susceptibilidade ao fogo, variando entre muito baixo, baixo, médio e alto, e posteriormente verificada a incidência de focos de queimadas detectados pelo AVHRR/NOAA-12 em cada classe. As áreas com susceptibilidade mais elevada — 'média' e 'alta' — apresentaram maior incidência de focos, sendo interpretado como efeito de maior disponibilidade de combustível vegetal. Dos 11.190 focos de queimadas ocorridos, 72% ocorreram nessas classes, indicando resultados satisfatórios no desenvolvimento preliminar desse método. Casos de alta incidência de focos encontrados nas classes com susceptibilidade 'muito baixa' e 'baixa' foram atribuídos principalmente à resolução espacial grosseira de 1,5 km dos mosaicos AVHRR e erros de registro dos focos de queimadas e dos mosaicos e, em menor escala, às características espectrais das superfícies.

3.1 - Introdução

No século passado, até o final da década de 60, a principal atividade econômica do Cerrado era a pecuária bovina extensiva, realizada em pastagens naturais. A partir da construção de Brasília e com os incentivos governamentais aplicados no setor agropecuário da região, expandiu-se a ocupação com culturas agrícolas e bovinocultura em pastagem implantada, fazendo do Cerrado a maior região produtora de grãos do Brasil (ALHO & MARTINS, 1995). A pecuária extensiva ocupa atualmente cerca de 60% da área do Cerrado e a cultura intensiva de grãos, principalmente soja, cerca de 6% (CONSERVATION INTERNATIONAL [CI], 2002). Mas, apesar da utilização de modernas técnicas na agropecuária, ainda é mantida a prática de manejo antiga e barata baseada no uso do fogo para renovação e limpeza de pastagens, bem como para abertura e limpeza de áreas agrícolas COUTINHO (1990; 2000; MISTRY, 1998a; 1998b). Foi estimado que cerca de 20 a 30% do Cerrado são queimados anualmente (COUTINHO, 1990; FRANÇA, 2000). Atualmente, o uso

do fogo na limpeza de restos culturais deixou de ser empregado nas culturas anuais mecanizadas (RAMOS NETO, 2000).

A elevada incidência de queimadas tem sido relacionada com efeitos prejudiciais ao ambiente, tais como: redução da biodiversidade; empobrecimento do solo pela perda de nutrientes; erosão do solo sua pela maior exposição à chuva (ALHO & MARTINS, 1995; MUELLER-DUMBOIS & GOLDAMMER, 1990); poluição no âmbito local, como a causada pelo O₃ resultante de emissão de CO, NO_x, hidrocarbonetos; mudanças climáticas regionais; mudança climática em escala global devido ao efeito estufa decorrente da emissão de CO₂ e CH₄ (CRUTZEN & ANDREAE, 1990; MUELLER-DUMBOIS & GOLDAMMER, 1990); etc. Por outro lado, a completa supressão do fogo no Cerrado também acarreta efeitos ambientais como a redução de biodiversidade e aumento da densidade de plantas lenhosas com alteração na composição florística e fisionômica da vegetação (PIVELLO & NORTON, 1996; MOREIRA, 1996).

Trabalhos sobre a susceptibilidade da cobertura vegetal à ocorrência de queimadas começaram no início do século passado, com os primeiros índices de susceptibilidade ao fogo sendo desenvolvidos na década de quarenta, visando aperfeiçoar as práticas de prevenção e manejo do fogo (TURNER *et al.*, 1961). Tais índices podem ser úteis no Cerrado, auxiliando a preservação desse ambiente, com a emissão de avisos do grau de susceptibilidade ao fogo na vegetação, úteis no manejo do fogo. Uma vez conhecido o grau de susceptibilidade numa região, poderiam ser emitidos alertas para as áreas com maior susceptibilidade, incluindo aquelas destinadas à preservação e seu entorno, onde seriam tomadas medidas preventivas. Por outro lado, seriam localizadas as áreas de menor susceptibilidade, onde o uso do fogo controlado poderia ser autorizado.

A umidade da vegetação tem relação direta com sua inflamabilidade, podendo ocorrer a queima quando inferior a 30% (RONDE *et al.*, 1990; CHUVIECO & MARTIN, 1994). Dados de sensoriamento remoto orbital estão sendo acrescentados aos índices de susceptibilidade ao fogo para auxiliar na estimativa da umidade da vegetação, tendo como vantagem principal a coleta de dados sobre extensões continentais em intervalos regulares de tempo, com melhor resolução espacial que os dados meteorológicos. Estudos iniciados na década de setenta mostraram forte correlação entre índices de vegetação (IV) obtidos de dados espectrais e parâmetros biofísicos da vegetação, como fitomassa foliar verde, Índice de Área Foliar (IAF), (TUCKER, 1979; TUCKER & SELLERS, 1986) e umidade da fitomassa (PALTRIDGE & BARBER, 1988). Também foram encontradas altas correlações entre Índice

de Vegetação de Diferença Normalizada (IVDN) e variações fenológicas sazonais da vegetação (TUCKER, 1979; TUCKER & SELLERS, 1986; FRANÇA, 1994).

Os índices de susceptibilidade ao fogo que empregam dados orbitais são baseados principalmente em métodos que utilizam séries temporais de IV para caracterizar a atividade fotossintética da vegetação. Nestes casos, os melhores resultados são obtidos de perfis temporais nos quais o contraste entre a vegetação verde e a senescente é mais pronunciado (CHUVIECO & MARTIN, 1994). O IV mais utilizado é o IVDN cuja fórmula é $IVDN = (IP - V) / (IP + V)$, onde **IP** é reflectância do pixel no infravermelho próximo e **V** é reflectância no vermelho (TUCKER, 1979; TUCKER & SELLERS, 1986). Teoricamente, o IVDN pode variar de -1,0 a +1,0, mas os valores mais comuns em estudos de vegetação estão na faixa entre -0,1 e +0,6 (JUSTICE *et al.*, 1985). Valores altos, ao redor de +0,5, indicariam vegetação verde cobrindo densamente o solo, portanto com baixo risco de fogo. Valores baixos, por volta de +0,1, indicariam vegetação cobrindo esparsamente o solo, ou vegetação senescente ou seca e, portanto, com maior risco de fogo. Valores em torno de zero ou negativos indicariam a ausência de vegetação, incluindo corpos d'água e solo nu (HOLBEN, 1986). Os seguintes intervalos de IVDN foram obtidos com dados do sensor 'Advanced Very High Resolution Radiometer / National Oceanic and Atmospheric Administration' (AVHRR/NOAA) para a vegetação do cerrado: 0,20-0,55 por JUSTICE *et al.* (1985); 0,20-0,35 por TOWNSHEND *et al.* (1987); 0,12-0,28 por FRANÇA (1994); e 0,14-0,59 por ALMEIDA (1997).

Um parâmetro essencial para o cálculo da susceptibilidade ao fogo é a quantidade de combustível vegetal disponível. O IVDN está relacionado com a fitomassa foliar verde (TUCKER 1979; TUCKER & SELLERS, 1986), podendo ser um indicativo da quantidade de combustível, além de umidade. Conforme observado por FRANÇA (2000) no Cerrado e por EVA & LAMBIN (1998a;1998b) na savana africana, o IVDN diminui sazonalmente e na estação seca pode atingir valores tão baixos quanto os de queimada e solo exposto, dificultando a verificação da existência de combustível vegetal.

Segundo FRANÇA (1994; 2000) e FRANÇA & SETZER (1998), dados do canal 3 (3,7 μ m, infravermelho termal) do sensor AVHRR/NOAA mostram que a diminuição da cobertura vegetal eleva a temperatura da superfície e, inversamente, a superfície recoberta por vegetação apresenta temperatura inferior à de solo exposto. Com base nessas características do canal 3 e do IVDN, FRANÇA (2000) mostrou que é possível delimitar áreas queimadas e, possivelmente, ainda obter uma indicação da quantidade de combustível vegetal.

Dados de sensores orbitais podem indicar a inflamabilidade e, possivelmente, a quantidade de combustível vegetal, mas também é necessária uma fonte de ignição para o início de uma queimada. As atividades antrópicas ligadas a práticas agropecuárias são sua principal causa (COUTINHO, 1990; 2000; MISTRY, 1998a; 1998b), sendo estimado que entre 70 e 75% da área queimada ocorrem no período de estiagem FRANÇA (2000).

O Serviço Florestal dos EUA desenvolveu para uso operacional um Sistema de Avaliação de Fogo em Vegetação que gera mapas diários de susceptibilidade ao fogo. Este sistema utiliza, entre outros dados, índices derivados do IVDN obtidos de imagens AVHRR/NOAA para estimar a umidade do combustível vivo (BURGAN, 1996; FOREST SERVICE [FS], 2001). A NOAA dos EUA gera mapas experimentais diários de potencial de fogo, baseados na estimativa do estresse da vegetação que, por sua vez, é derivado da combinação do IVDN com a temperatura de superfície, obtida dos canais termais do AVHRR (KOGAN *et al.*, 2001a, b).

3.2 - Objetivo

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um método para classificar a cobertura vegetal do Cerrado quanto à susceptibilidade ao fogo com o uso de mosaicos quinzenais de imagens AVHRR/NOAA.

3.3 - Materiais e Método

3.3.1 - Área de estudo

A área de estudo foi a mesma utilizada por PEREIRA JR. (1992) e FRANÇA (2000), segundo interpretação do Mapa de Vegetação do Brasil produzido pelo IBGE (1993). Ela abrange a porção contínua da Região Fitoecológica do Cerrado definida como 'Savana' no Mapa de Vegetação, junto com as áreas de 'Tensão Ecológica', que indicam o contato entre Cerrado e outros tipos de vegetação. Enclaves de 'Floresta' ou Caatinga, definida como 'Savana Estépica', também estão incluídos. A área incluiu tanto as regiões de cobertura vegetal natural quanto as antropizadas. A área de estudo ocupa 2 200 000 km², cobrindo cerca de um quarto do território brasileiro, entre os paralelos 02°30' S e 26°00' S e os meridianos 41°45' O e 62°00' O, abrangendo a totalidade do Distrito Federal, a maior parte dos estados de Goiás, Tocantins e Mato Grosso do Sul, e parte dos estados de Mato Grosso, Maranhão, Piauí, Minas Gerais, Bahia, São Paulo, Paraná, Rondônia e Pará (Figura 3.1).

A cobertura vegetal natural predominante da área de estudo é o Cerrado *lato sensu*, caracterizada por seus diferentes tipos fitofisionômicos, que apresentam um gradiente de densidade de árvores, dispersas sobre um estrato herbáceo-arbustivo, geralmente formado por gramíneas. A maior densidade arbórea é no Cerradão, com formação de dossel contínuo. Densidade intermediária é encontrada, em ordem decrescente, no Cerrado *stricto sensu*, Campo Cerrado e Campo Sujo. No Campo Limpo ocorre somente o estrato herbáceo (COUTINHO, 1990, 2000; RIBEIRO & WALTER, 1998).

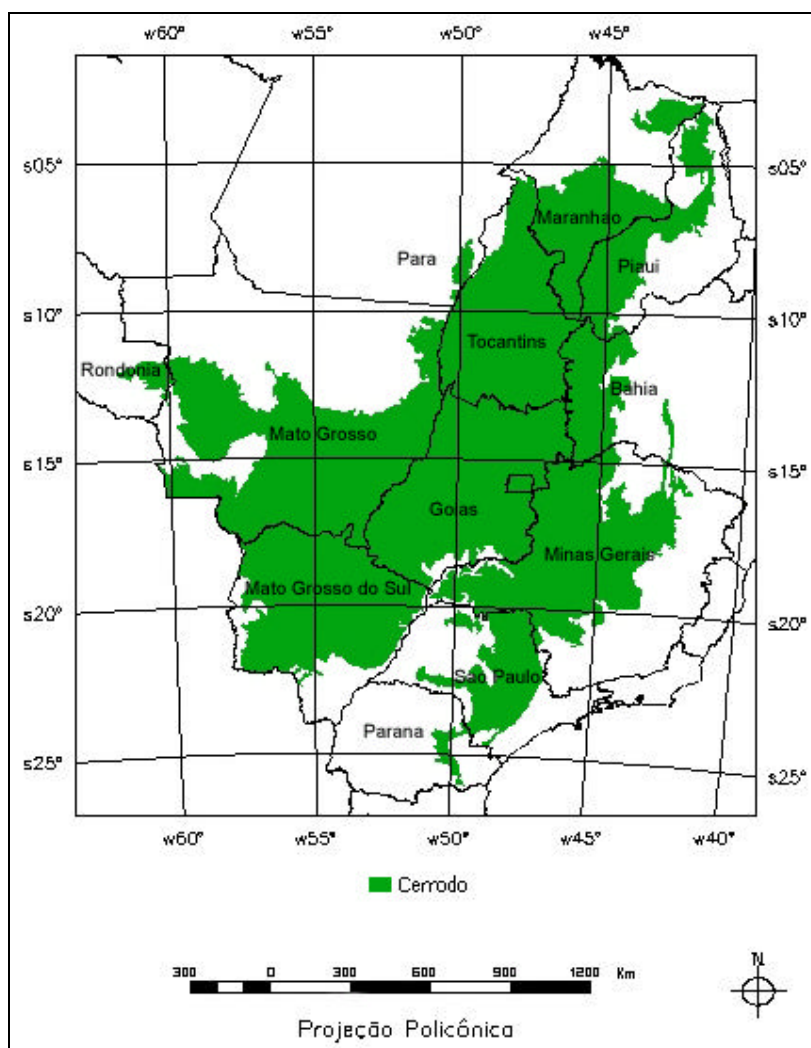


Figura 3.1 – Área de estudo com extensão de 2.200.000 km².
Fonte: PEREIRA JR. (1992) e FRANÇA (2000).

O clima predominante é tropical-quente-subúmido (Aw), caracterizado por forte sazonalidade das chuvas e estabilidade da temperatura média diária (DIAS, 1996). A precipitação média anual varia de 600 a 2000 mm, oscilando entre 1000 e 1600 mm em 75%

da área do Cerrado (ASSAD & EVANGELISTA, 1994), com 5 a 10% ocorrendo no período de estiagem, de maio a setembro (CASTRO *et al.*, 1994). Durante a estiagem existem as melhores condições meteorológicas para dessecamento e queima do estrato herbáceo. As temperaturas mais elevadas ocorrem durante a primavera-verão com médias de 20 a 30°C e as mais baixas no inverno com valores médios entre 15° e 24°C (NIMER & BRANDÃO, 1989).

3.3.2 - Materiais

Para processamento dos dados georreferenciados, foi utilizado o Sistema de Informações Geográficas (SIG) SPRING 3.5 para ambiente Windows (CÂMARA *et al.*, 1996; DIVISÃO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS / INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS [DPI/INPE], 2002).

Foram utilizados mosaicos quinzenais do canal 3 e IVDN, com resolução espacial de 1,5 km, gerados de imagens digitais do AVHRR/NOAA-14, da passagem vespertina (18h30 GMT). Cada mosaico corresponde a um intervalo de quatorze a dezesseis dias consecutivos, do dia 01 a 14, e de 15 a 30 ou 31 de cada mês, no período de maio a outubro/1998, obtidos por FRANÇA (2000) (Figura 3.2a e 3.2b).

O IVDN varia entre -1 e +1, e o critério de seleção do valor do pixel no mosaico foi o máximo valor na quinzena. A temperatura da superfície é representada na imagem do canal 3 por números digitais entre 0 e 255, com os menores valores correspondendo as maiores temperaturas e vice-versa. o critério de seleção do valor do pixel no mosaico do canal 3 foi a máxima temperatura, que nas imagens AVHRR correspondente aos menores números digitais. A utilização de mosaicos quinzenais diminui os problemas das imagens relacionados ao ângulo de imageamento, nuvens e ruídos, e cobertura parcial da área de estudo (HOLBEN, 1986). Foi utilizado também o mosaico do IVDN máximo no período de maio/1998 a abril/1999 obtido por FRANÇA (2000) (Figura 3.2c).

Foram usados dados diários das coordenadas geográficas dos focos de queimadas detectados no período de maio a outubro/98 nas imagens do canal 3 do AVHRR/NOAA-12, passagem vespertina (21h30 GMT). Os dados foram gerados pela Divisão de Satélites Ambientais (DSA) do INPE, baseado no método descrito por PEREIRA (1987) e PEREIRA & SETZER (1993), com acurácia de 2 km conforme PEREIRA & SETZER (2001).

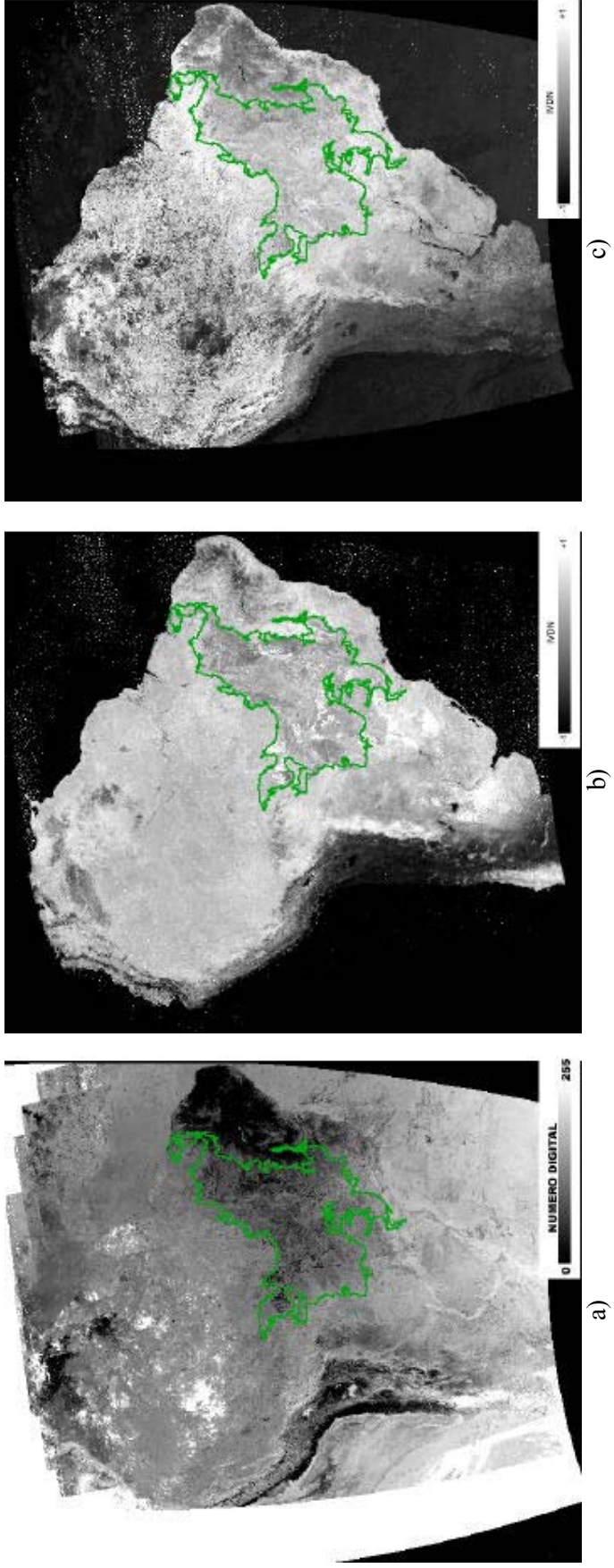


Figura 3.2 – Mosaicos quinzenais de imagens AVHRR/NOAA-14 da América do Sul com o limite da área de estudo: a) canal 3, 1ª quinzena de maio/1998; b) IVDN, 1ª quinzena de maio/1998; c) máximo IVDN, maio/1998 a abril/1999.

3.3.4 - Método

3.3.4.1 – Fundamentação teórica

Para classificar a cobertura vegetal quanto à sua inflamabilidade, com base nos dados dos mosaicos do IVDN e do canal 3 do AVHRR, foi considerada a fundamentação teórica a seguir:

- o IVDN está relacionado positivamente com a umidade da vegetação verde;
- a temperatura no canal 3 está relacionada negativamente com o grau de recobrimento do solo pela vegetação e, dessa forma, é um parâmetro relacionado à quantidade de combustível vegetal existente;
- áreas com alto recobrimento por vegetação verde — formações florestais e culturas anuais em fase de crescimento — apresentam maior teor de umidade nas plantas e conseqüentemente menor inflamabilidade. Nessas áreas, espera-se encontrar IVDNs superiores a 0,3 com valores máximos ao redor de 0,5 (FRANÇA, 2000);
- corpos d'água como mar, represas e rios, assim como nuvens, têm IVDN próximo de zero ou negativo, enquanto que no canal 3 apresentam-se com temperaturas inferiores às das áreas terrestres. Os corpos d'água têm inflamabilidade nula, enquanto que a persistência de nuvens em um mosaico pode indicar condições de chuva e umidade que diminuem a inflamabilidade da vegetação;
- áreas com IVDNs baixos, entre zero e 0,3, associadas a temperaturas no canal 3 inferiores às de solo exposto, que correspondem a valores de número digital (ND) acima de 50 (FRANÇA, 2000), indicam a existência de cobertura vegetal seca em quantidade suficiente para a ocorrência de uma queimada;
- áreas queimadas são delimitadas com base nos mosaicos do canal 3, as quais correspondem aos locais com aumento de temperatura em relação ao mosaico da quinzena anterior, indicado por queda no ND igual ou superior a 50. Além disso, as áreas queimadas correspondem às com temperatura mais elevada no mosaico, apontado por valores de ND abaixo de 40. Essas áreas não queimam novamente durante a mesma estação seca (FRANÇA, 2000).

Quanto à susceptibilidade do Cerrado ao fogo foi considerado que:

- a existência de áreas queimadas, bem como de focos de incêndios, indicam, além da inflamabilidade do combustível, a atividade do agente humano iniciador do fogo;

— não ocorrem queimadas dos restos vegetais em áreas de culturas anuais mecanizadas (RAMOS NETO, 2000) porque, de modo geral, essa prática foi substituída pela incorporação dos restos ao solo, dentro da prática denominada plantio direto.

3.3.4.2 - Geração dos mapas de susceptibilidade ao fogo

A susceptibilidade da cobertura vegetal ao fogo foi estimada com base nos mosaicos quinzenais obtidos das imagens AVHRR/NOAA-14. Operações do tipo ‘pixel a pixel’ foram realizadas entre os mosaicos, utilizando um algoritmo implementado no SIG, gerando mapas quinzenais de susceptibilidade da cobertura vegetal. Para gerar os mapas foram realizadas as seguintes etapas:

1. Importação pelo SIG dos mosaicos AVHRR/NOAA-14 e do limite da área de estudo;
2. Realização de estudos e testes nos mosaicos IVDN e canal 3 para determinar os valores limiares das classes, considerando as características espectrais dos tipos de cobertura da área de estudo com enfoque na susceptibilidade ao fogo;
3. Estruturação do algoritmo em Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL) do SIG. O algoritmo utilizou critérios com base nos valores limiares das classes de susceptibilidade determinados na etapa 2. A seqüência de aplicação dos critérios foi hierárquica, fazendo com que prevalecesse o resultado do critério superior.
4. Geração dos mapas quinzenais de susceptibilidade ao fogo;
5. Análise da ocupação espaço-temporal do Cerrado pelas classes de susceptibilidade.

3.3.4.3 - Sobreposição dos mapas de susceptibilidade ao fogo com os focos de queimadas

A avaliação das classes de susceptibilidade ao fogo dos mapas quinzenais foi realizada através da sobreposição com os focos de queimadas gerados de imagens do sensor AVHRR a bordo do NOAA-12, conforme as seguintes etapas:

1. Importação pelo SIG dos dados diários de localização dos focos de queimadas do AVHRR;
2. Seleção de duas datas por quinzena dos dados de focos de queimadas de passagens do NOAA-12 recobrimdo toda a área de estudo, totalizando 24 datas;
3. Sobreposição dos mapas quinzenais de susceptibilidade com os focos de queimadas da quinzena posterior à do mapa, possibilitando quantificar a incidência de focos por classe de susceptibilidade;
4. Análise espaço-temporal dos dados oriundos da etapa 3.

Os focos de queimadas foram considerados como verdade de campo em relação à incidência de queimadas em vegetação do Cerrado, indicando as regiões e as datas em que foram satisfeitas as três condições necessárias para a ocorrência de fogo.

3.3 - Resultados e Discussão

3.3.1 - Algoritmo para geração dos mapas de susceptibilidade ao fogo

Os critérios utilizados no algoritmo final, resultado de vários testes no SIG, estão descritos na Tabela 3.1. O algoritmo foi executado na seqüência cronológica das quinzenas, porque o critério sete utilizou dados dos mapas de susceptibilidade anteriores.

Tabela 3.1 – Critérios do algoritmo para gerar os mapas quinzenais de susceptibilidade ao fogo.

Critério	Canal 3	IVDN	IVDN máximo	Outros	Classe
1	DN > 110	IVDN < 0,22	---	---	<i>Água-Nuvem</i>
2	--	IVDN ≥ 0,20	---	---	<i>Cerrado-Verde</i>
3	65 ≤ DN ≤ 140	-0,06 ≤ IVDN ≤ 0,24	---	---	<i>Cerrado-Marrom</i>
4	DN < 65	-0,06 ≤ IVDN ≤ 0,24	---	---	<i>Cerrado-Amarelo</i>
5	---	---	IVDN ≥ 0,40	---	<i>Cultura</i>
6	DN < 45	---	---	(DN _{c3ant} - DN _{c3at}) ≥ 40	<i>Queimada</i>
7	---	---	---	<i>Queimada-ant</i>	<i>Queimada-anterior</i>

Obs.: a) $c3_{ant}$ = canal 3 da quinzena anterior c) $c3_{at}$ = canal 3 na quinzena atual; f) *Queimada-ant* = áreas queimadas classificadas nas quinzenas anteriores.

O critério 1 determinou áreas ocupadas por corpos d'água e nuvens, associadas à classe *Água-Nuvem*. O critério 2 delimitou áreas com alta densidade de vegetação verde, associadas aos IVDN iguais ou superiores a 0,2; essa classe foi denominada *Cerrado-Verde*. A classe *Cerrado-Marrom*, determinada pelo critério 3, correspondeu às áreas com combustível vegetal seco, identificadas por baixos valores de IVDN, associadas a temperaturas intermediárias no canal 3. O critério 4 também determinou as áreas com combustível vegetal seco identificadas pelos baixos IVDN, mas associadas com temperaturas maiores no canal 3, ou seja, com menor quantidade de combustível que na classe *Cerrado-Marrom*; essa classe foi denominada *Cerrado-Amarelo*. Culturas anuais, principalmente soja em fase de crescimento, foram delimitadas pelo critério 5 que identificou IVDN iguais ou superiores a 0,4; essa classe foi denominada *Cultura*. Áreas queimadas, incluídas na classe *Queimada*, foram delimitadas nos mosaicos pelas temperaturas elevadas e simultaneamente pelo aumento da temperatura da superfície quando comparada com dados da quinzena anterior. Finalmente, o critério 7 converteu as áreas da classe *Queimada* da quinzena anterior

para a classe *Queimada-anterior*. A aplicação do algoritmo gerou mapas de susceptibilidade ao fogo para cada quinzena no período de estudo (Figuras 3.3 a 3.6).

Foram atribuídos os seguintes graus de susceptibilidades ao fogo para as classes anteriormente descritas: a) muito baixo para *Água-Nuvem*, *Queimada*, *Queimada-anterior* e *Cerrado-Verde*; b) baixo para *Cultura*; c) médio para *Cerrado-Marrom*; d) alto para *Cerrado-Marrom*.

3.3.2 - Análise espaço-temporal dos mapas de susceptibilidade ao fogo

A área percentual de cada classe, por quinzena, está na Figura 3.7 e na Tabela 3.2. Foi observada a conversão da classe *Cerrado-Verde* para *Cerrado-Marrom* e desta para *Cerrado-Amarelo* até a 1ª quinzena de setembro, quando então passou a ocorrer o inverso, a conversão da *Cerrado-Amarelo* para *Cerrado-Marrom* e desta para *Cerrado-Verde*. Além disso, como as áreas queimadas foram agregadas na classe *Queimada-anterior*, a conversão das outras classes para esta foi definitiva.

A classe *Cerrado-Marrom* apresentou as maiores áreas percentuais em todas as quinzenas, com valores sempre superiores a 40% da área de estudo — aproximadamente 862 mil km². A área dessa classe aumentou progressivamente e por todo Cerrado, atingindo o máximo de 78% na 1ª quinzena de julho — cerca de 1.678 mil km² — (Figura 3.4), principalmente pela incorporação de áreas da classe *Cerrado-Verde*. Esse aumento acompanhou o avanço da estação seca, quando se verifica a senescência e queda de folhas do estrato herbáceo do cerrado e conseqüente aumento do combustível vegetal seco. A partir da 2ª quinzena de julho até a 1ª quinzena de setembro, a área dessa classe diminuiu devido à incorporação de parte dela pela classe *Cerrado-Amarelo* (Figura 3.5). A partir da 2ª quinzena de setembro a área manteve-se estável, pois foram incorporadas áreas da classe *Cerrado-Amarelo* e, de modo simultâneo, foi convertida para a *Cerrado-Verde*, possivelmente devido ao início das chuvas com conseqüente rebrota e aumento da umidade da vegetação (Figura 3.6).

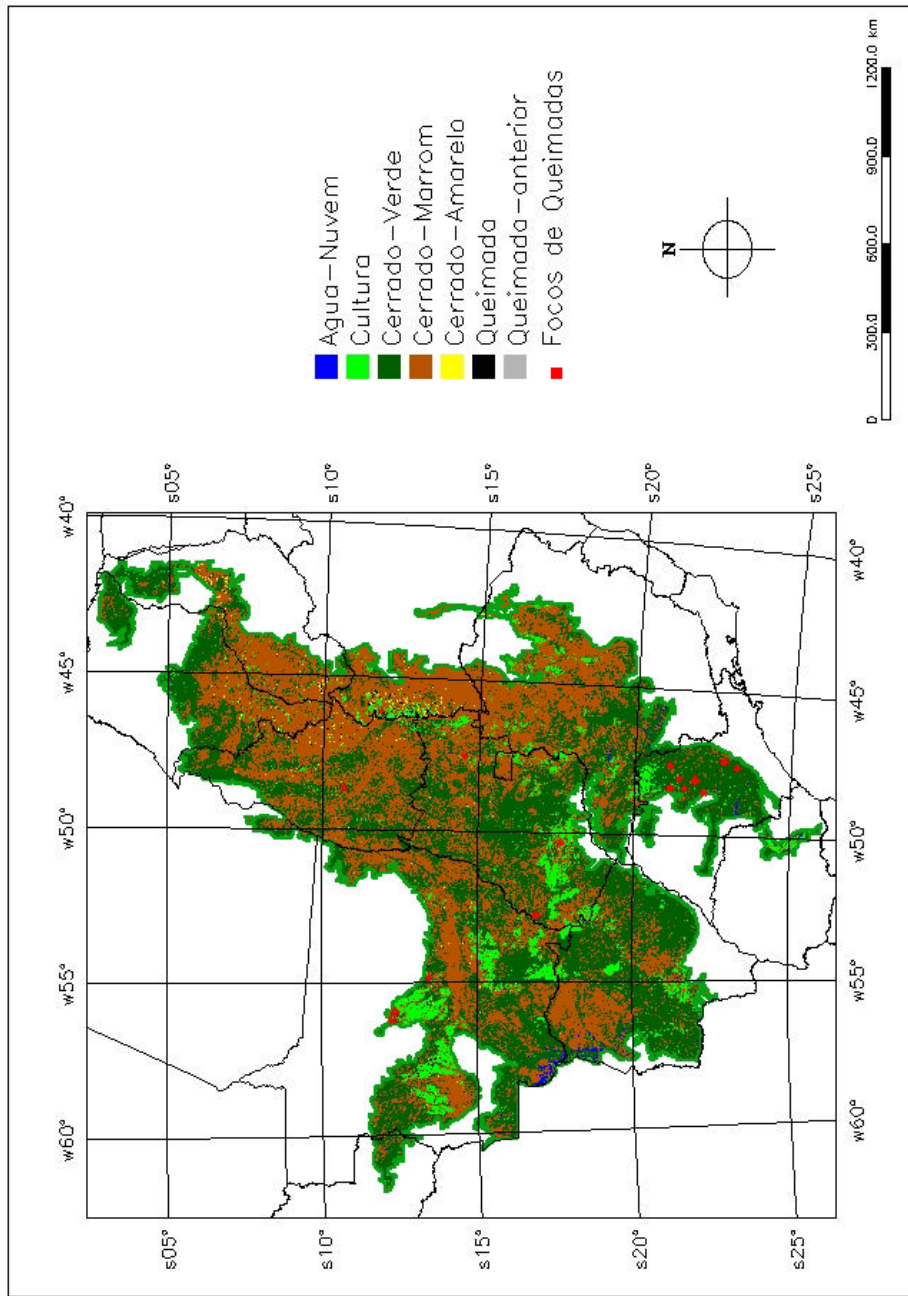


Figura 3.3 – Mapa de susceptibilidade ao fogo do Cerrado da 1ª quinzena de maio/1998 com os focos de queimadas de 22/maio/1998. Neste período ocorreu a maior área da classe *Cerrado-Verde* com 1.019 mil km², correspondendo a 48% do Cerrado. A classe *Cultura* também tem sua maior área neste período com 140 mil km², correspondendo a 7% do Cerrado.

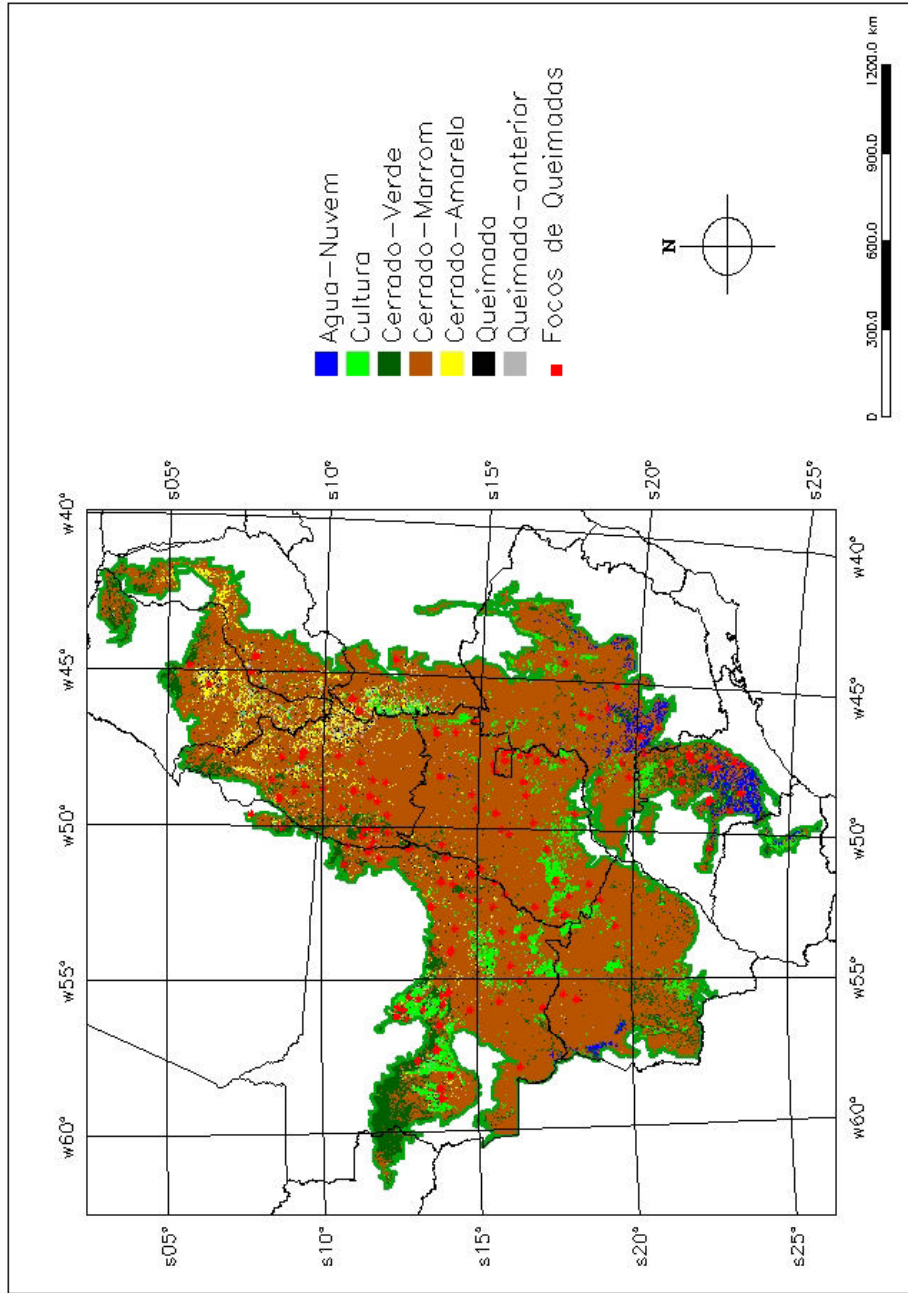


Figura 3.4 – Mapa de susceptibilidade ao fogo do Cerrado da 1ª quinzena de julho/1998 com os focos de queimadas de 29/julho/1998. Neste período, a classe *Cerrado-Marrrom* atingiu a sua maior área com cerca de 1.678 mil km², correspondendo a 78% da área de estudo. A soma das classes *Cerrado-Amarelo* e *Cerrado-Marrrom* ocupa 1.742 mil km², correspondente a 81% da área de estudo, estando no período entre a 2ª quinzena de junho e 1ª quinzena de agosto quando esta soma alcançou suas maiores áreas.

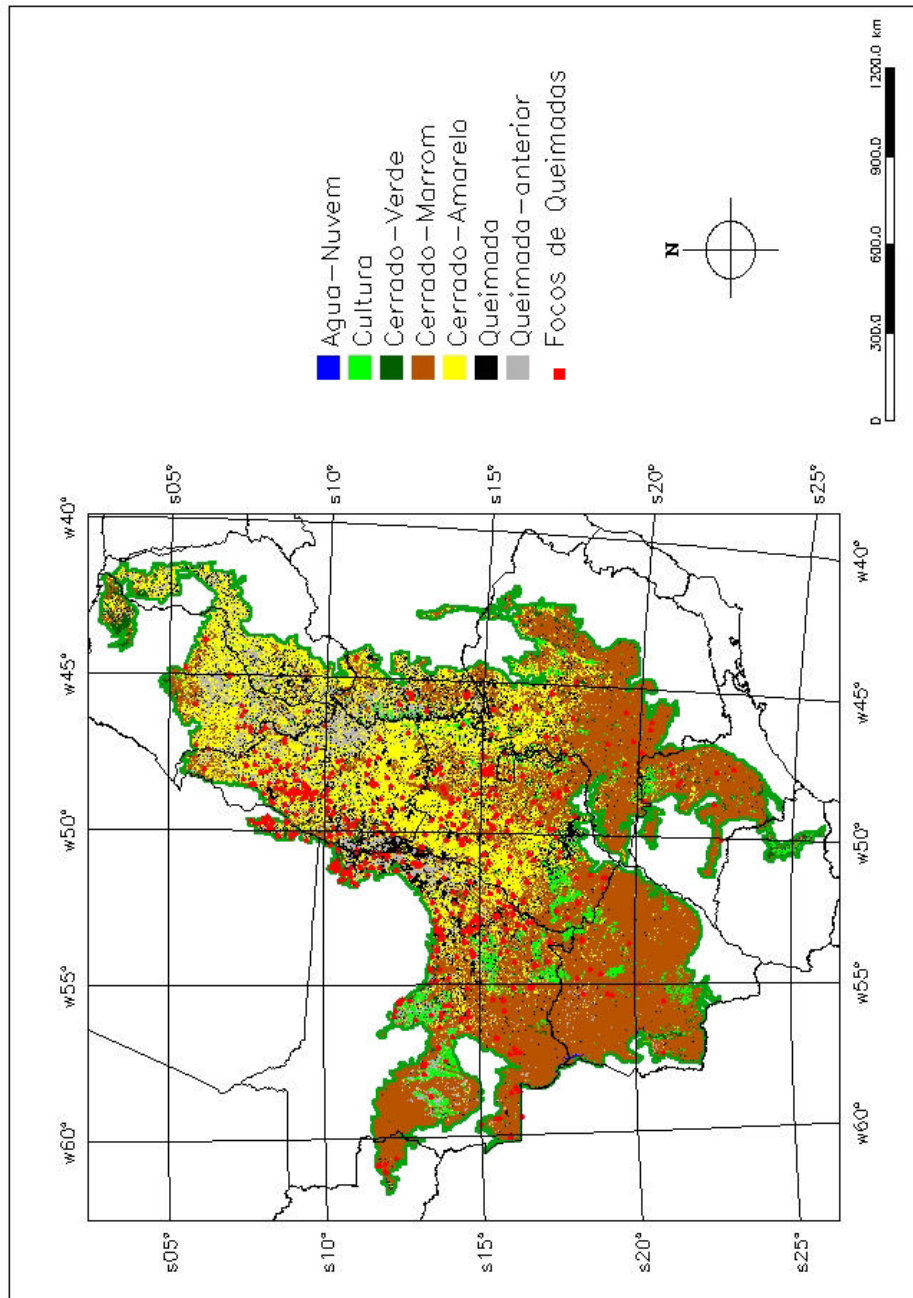


Figura 3.5 – Mapa de susceptibilidade do Cerrado ao fogo da 2ª quinzena de agosto/1998 com os focos de queimadas de 12/setembro/1998. A classe *Queimada* apresentou sua maior área nesta quinzena com 202 mil km², correspondendo a 9% da área de estudo. A classe *Cerrado-Amarelo* ocupou 588 mil km², correspondendo a 27% da área de estudo, valor similar aos 28% da quinzena seguinte quando esta classe alcançou sua maior área. A classe *Cerrado-Verde* ocupou 36 mil km² nesta quinzena, correspondendo a 2% da área de estudo, estando no período entre a 1ª quinzena de agosto e a 1ª quinzena de outubro quando esta classe atingiu suas menores áreas.

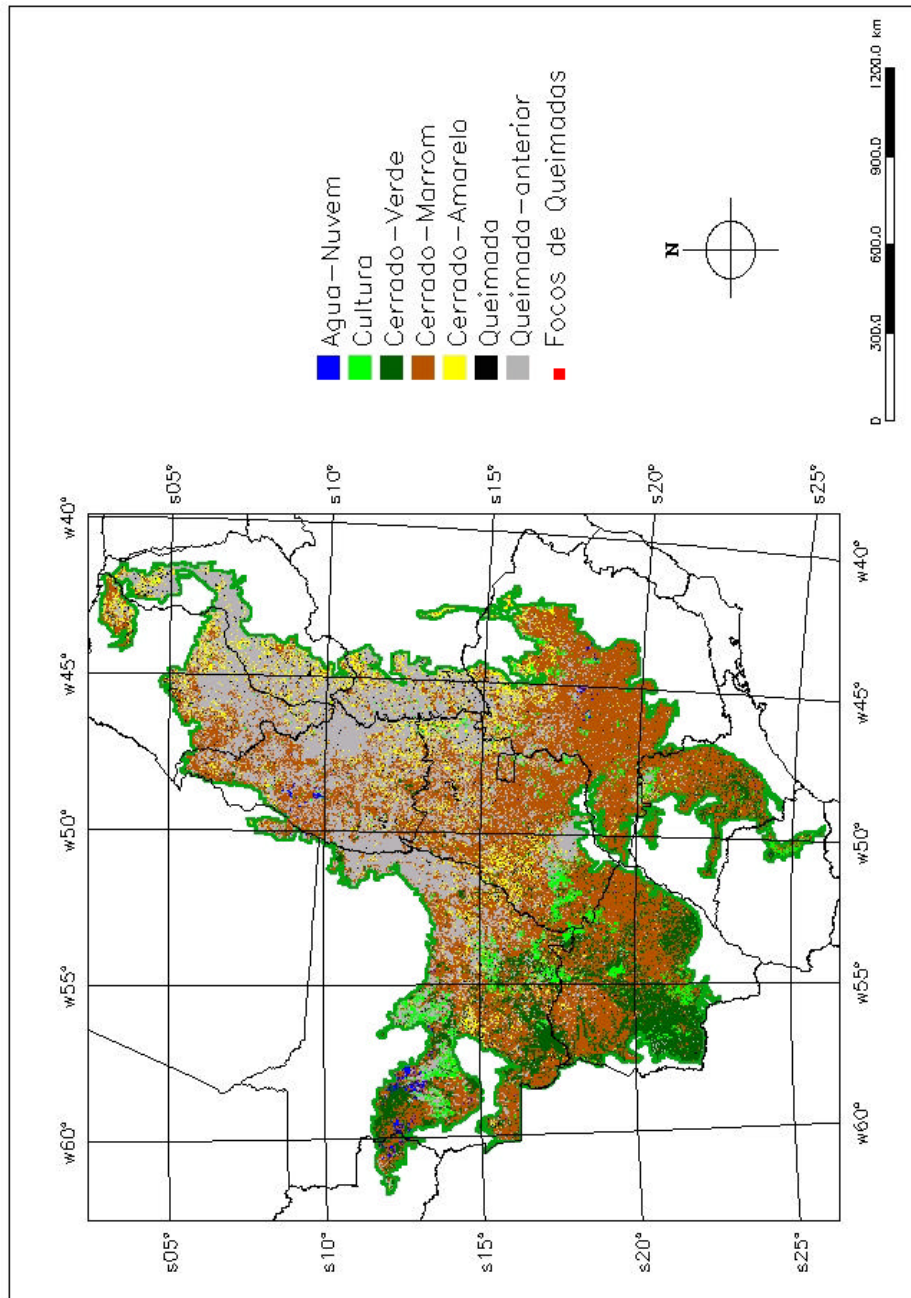


Figura 3.6 – Mapa de susceptibilidade do Cerrado ao fogo da 2ª quinzena de outubro/1998. A classe *Queimada-anterior* alcançou sua maior área nesta quinzena com 681 mil km², correspondendo a 32% da área de estudo. A classe *Queimada-anterior* junto com a *Queimada* atingiram 714 mil km², correspondendo a 33% da área de estudo.

Tabela 3.2 – Área percentual e número de queimadas por classe de susceptibilidade ao fogo do Cerrado, de maio a outubro/1998.

QUIN- ZENA 1998	DIA 1998	FOCOS		CLASSES						Queimada- anterior							
		Água-Nuvem		Cerrado-Verde		Cultura		Cerrado-Amarelo		Cerrado-Marron		Queimada					
		Área	Focos	Área	Focos	Área	Focos	Área	Focos	Área	Focos	Área	Focos				
		nº	%	nº	%	nº	%	nº	%	nº	%	nº	%	nº	%	nº	%
1ª Maio	22/maio	38	0	19	50	8	21	2	5	8	21	0	1	3	0	0	0
	26/maio	31	0	12	39	6	19	0	0	13	42	0	0	0	0	0	0
2ª Maio	4/jun	60	1	18	30	5	8	0	0	33	55	0	3	5	0	0	0
	9/jun	93	1	24	26	11	12	1	1	56	60	0	0	0	0	0	0
1ª Junho	18/jun	153	2	22	15	28	18	0	1	97	63	0	2	1	1	1	1
	22/jun	128	0	25	19	30	23	2	2	69	54	0	0	0	2	2	2
2ª Junho	1/jul	215	4	25	12	46	21	2	4	128	59	1	2	1	1	6	3
	6/jul	157	3	26	17	14	9	6	2	107	68	1	5	3	0	0	0
1ª Julho	20/jul	183	0	15	8	25	14	3	17	124	68	1	1	1	1	1	0
	29/jul	322	7	23	7	36	11	7	7	235	73	1	6	2	8	3	3
2ª Julho	3/ago	259	0	19	7	8	3	9	26	186	72	2	5	2	15	6	6
	12/ago	361	0	22	6	14	4	6	43	237	66	2	22	6	23	6	6
1ª Agosto	16/ago	590	4	24	4	22	4	15	113	354	60	3	53	9	20	3	3
	21/ago	1.817	10	52	3	83	5	21	377	1.137	63	3	98	5	60	3	3
2ª Agosto	3/set	947	0	22	2	41	4	27	279	396	42	9	127	13	82	9	9
	12/set	1.226	0	22	2	46	4	4	423	548	45	7	109	9	78	6	6
1ª Setembro	17/set	1.216	0	2	0	21	2	28	489	366	30	42	107	9	231	19	19
	26/set	991	0	7	1	18	2	5	381	302	31	7	71	7	212	21	21
2ª Setembro	1/out	1.274	0	1	0	28	2	22	456	324	26	6	103	8	362	28	28
	5/out	478	0	1	0	13	3	4	143	164	34	6	41	9	116	24	24
1ª Outubro	19/out	345	0	1	0	7	2	11	36	229	66	3	12	3	60	18	18
	23/out	306	0	19	6	7	2	2	26	175	57	3	9	3	70	23	23
2ª Outubro	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
TOTAL		11.190	---	401	4	517	5	---	2.828	5.288	47	---	777	7	1.347	12	12

Obs.: área percentual calculada em relação ao total de 2.200.000 km². O total de focos de queimadas no período de estudo foi 11.190.

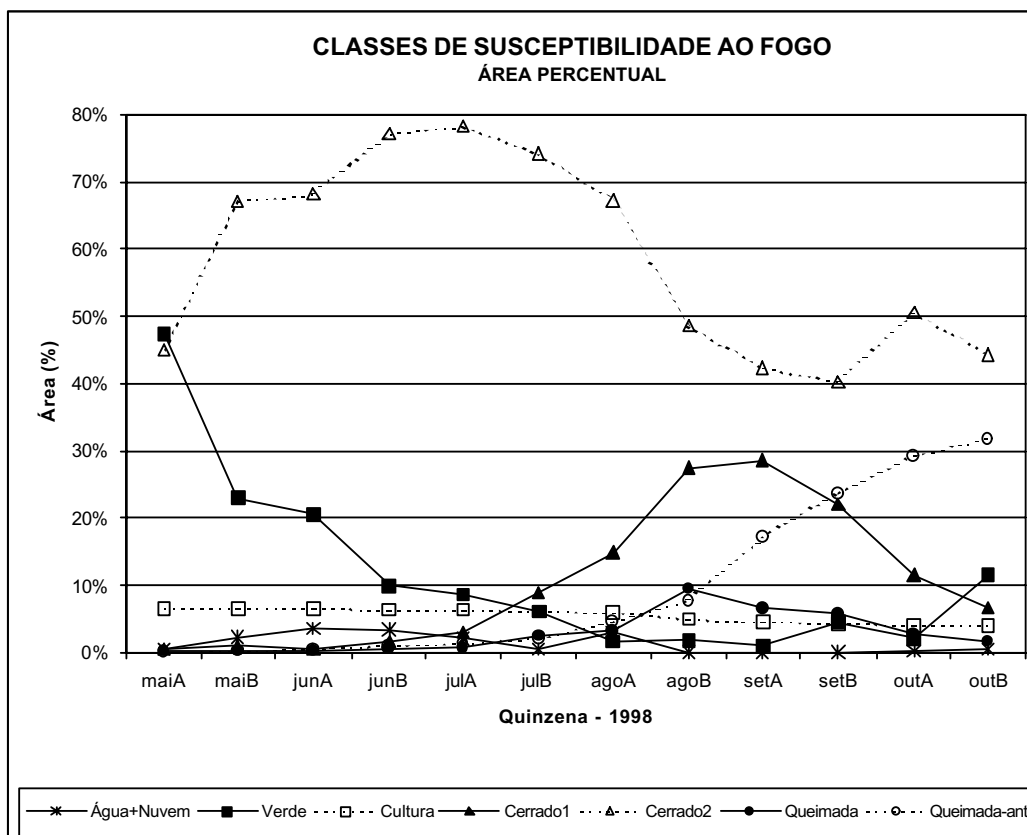


Figura 3.7 – Área percentual das classes de susceptibilidade ao fogo por quinzena no período de maio a outubro/1998, em relação à área do Cerrado de 2.200.000 km².

A classe *Cerrado-Amarelo* inicialmente cobriu uma área inexpressiva (Figura 3.3), aumentando na 1^a quinzena de julho, desde a região Norte do Cerrado em direção ao Sul, atingindo 28% na 1^a quinzena de setembro — aproximadamente 612 mil km² —, quando ocupava toda região Centro-Norte (Figura 3.5). Posteriormente, a área reduziu, chegando a 7% na última quinzena de outubro (Figura 3.6). Conforme relatado anteriormente, o aumento da área foi devido à incorporação de áreas da *Cerrado-Marrom*, e vice-versa.

A conversão de *Cerrado-Marrom* para *Cerrado-Amarelo*, e vice-versa, parece indicar que a diferenciação entre essas classes não ocorreu somente em função da quantidade de combustível, mas também da umidade do mesmo. Uma possível explicação seria que a temperatura do canal 3, além do recobrimento, também respondeu à umidade de fitomassa verde.

Considerando a união das classes *Cerrado-Amarelo* e *Cerrado-Marrom*, sua área tem um crescimento contínuo até a 2^a quinzena de julho, quando ocupa 83% do Cerrado — cerca de 1.779 mil km². No período entre a 2^a quinzena de junho e 1^a quinzena de agosto, estas duas classes ocuparam em conjunto cerca de 80% da área de estudo (Figura 3.4).

A classe *Cerrado-Verde* ocupou, inicialmente, 48% da área de estudo — cerca de 1.019 mil km² — (Figura 3.3), valor similar a *Cerrado-Marrom*, diminuindo até o mínimo de 1% na 1^a quinzena de setembro (Figura 3.5), devido à conversão para a classe *Cerrado-Marrom*. Nessa diminuição os remanescentes da classe foram se concentrando na borda Amazônica do Cerrado. A área aumentou nos períodos seguintes pela incorporação de área da *Cerrado-Marrom*, atingindo 12% na 2^a quinzena de outubro (Figura 3.6), sendo a expansão iniciada nas regiões Oeste e Sul do Cerrado. Os dados mostraram que a variação de área acompanhou o regime de chuvas, diminuindo com o avanço da estiagem e aumentando com o início das chuvas.

A classe *Queimada* acompanhou o ciclo das queimadas no Cerrado, apresentando aumento até a 2^a quinzena de agosto, quando atingiu 9% da área de estudo — cerca de 202 mil km² — (Figura 3.5), reduzindo em seguida, até 1% no final de outubro (Figura 3.6). A classe *Queimada-anterior* apresentou aumento contínuo pelo fato de acumular áreas queimadas das quinzenas anteriores, atingindo 32% ao final do período — aproximadamente 681 mil km² — (Figura 3.6), ocupando principalmente a região Centro-Norte do Cerrado. A união das classes *Queimada* e *Queimada-anterior* atingiu 33% da área de estudo na última quinzena — cerca de 714 mil km² — (Figura 3.6). Isso não significa que foram queimadas 33% da área do Cerrado, pois queimadas com área inferior a 1 km², que são as mais freqüentes no Cerrado (FRANÇA, 2000), podem levar a serem classificadas como *Queimada* os pixels dos mosaicos com área de 2,25 km² (1,5 km x 1,5 km), devido a uma característica específica do canal 3 do AVHRR/NOAA. Pode ser dito que as classes *Queimada* e *Queimada-anterior* delimitaram regiões com maior ocorrência de queimadas.

Até 2^a quinzena de julho, foram incorporadas às classes *Queimada* e *Queimada-anterior* principalmente as áreas das classes *Cerrado-Marrom* e em menor escala da *Cultura*. A partir de então, foram incorporadas das classes *Cerrado-Amarelo* e *Cerrado-Marrom*, e em menor escala da *Cultura*.

A classe *Cultura* cobriu inicialmente 7% da área de estudo — cerca de 140 mil km² — (Figura 3.3), terminando com 4% na última quinzena (Figura 3.6), devido à conversão para as classes *Queimada* e *Queimada-anterior*, que ocorreu principalmente na região Oeste da Bahia. A classe *Água-Nuvem* apresentou áreas inferiores a 4% da área de estudo, com as variações sendo decorrentes da persistência de nuvens nos mosaicos.

3.3.3 - Sobreposição dos mapas de susceptibilidade ao fogo com os focos de queimadas

A sobreposição dos focos de queimadas do AVHRR/NOAA-12 com os mapas de susceptibilidade (exemplos nas Figuras 3.3 a 3.5), permitiu verificar o número percentual de focos de queimada por classe, conforme representado na Figura 3.8 e a Tabela 3.2.

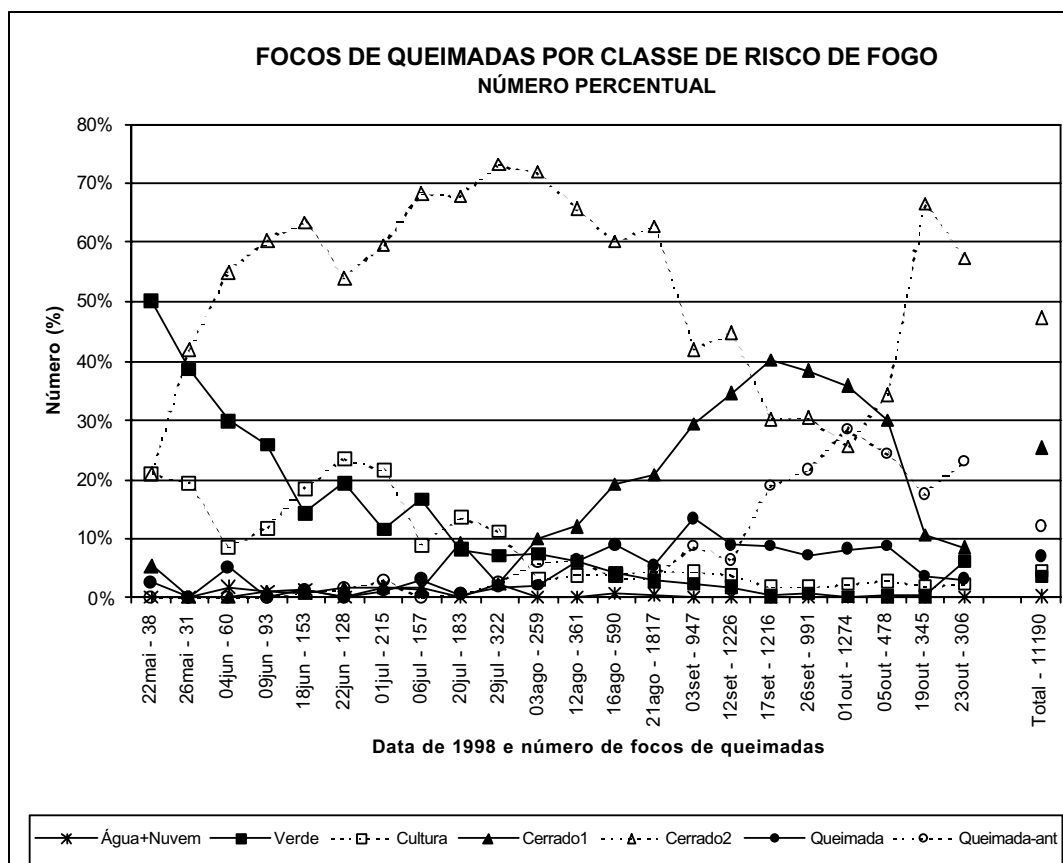


Figura 3.8 – Porcentagem de focos de queimadas por classe de susceptibilidade ao fogo do Cerrado em 24 dias no período de maio a outubro/1998.

Água-Nuvem: Nessa classe ocorreu o menor número de focos de queimadas, com valor máximo de 2% do total de focos de uma data. A ocorrência de focos nessa classe decorreu da detecção de queimadas nas imagens AVHRR/NOAA-12 em áreas que se encontravam sob nuvens nos mosaicos do AVHRR/NOAA-14. Além disso, erros de registro das duas fontes de dados — 2 km nas coordenadas dos focos (PEREIRA & SETZER, 2001) e até 6 km nos mosaicos (FRANÇA, 2000) — causaram erros na sobreposição dos focos de queimadas aos mosaicos. Apesar da ocorrência de focos nas áreas sob nuvens, a persistência

destas em um mosaico pode indicar condições de chuva e umidade relativa do ar que diminuem a inflamabilidade da vegetação.

Cerrado-Verde: Em geral, o número percentual de focos de queimadas nessa classe foi inferior a 10%, exceto no período entre o início de maio e o começo de julho. A alta porcentagem de focos nesse período, entre 12 e 50%, embora não esperado, possivelmente decorreu da queima de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, principal região na qual eles foram constatados. Nesta cultura, o dossel superior permaneceu verde, enquanto o dossel inferior se tornou senescente no decorrer do ciclo da cultura e inflamável no decorrer do período de estiagem. Dessa forma, essas áreas provavelmente foram classificadas nos mosaicos AVHRR como *Cerrado-Verde*, embora contivessem material vegetal inflamável.

Cultura: A porcentagem de focos de queimadas em áreas de cultura foi menor no período de agosto a outubro, com valor máximo de 5%, e maior no período de maio a julho, com valores entre 8 e 24%. Possivelmente, os maiores valores estão relacionados ao uso de queimadas para abertura de novas áreas agrícolas adjacentes às existentes. Essas áreas foram incluídas na classe *Cultura* em decorrência dos mesmos erros de registro descritos para a classes *Água-Nuvem*.

Queimada: Essa classe apresentou baixa porcentagem de focos de queimada nas datas ao longo do período de estudo, com valor máximo de 14% no início de setembro. No entanto, eram esperados valores ainda menores, pois áreas queimadas não contêm combustível vegetal. Possivelmente, esses valores são explicados pela resolução espacial dos mosaicos e pelo tamanho das queimadas na área de estudo. Queimadas com área menor que 1 km², são as mais frequentes no Cerrado (FRANÇA, 2000) e têm dimensões inferiores às do pixel dos mosaicos que é 2,25 km². Dessa forma, é possível que pixels classificados como *Queimada* ainda contivessem áreas não queimadas e com combustível vegetal. Tais áreas posteriormente foram queimadas e detectadas como focos pelo AVHRR/NOAA-12. Além disso, os mesmos erros de registro descritos para as classes *Água-Nuvem* e *Cultura* podem ter superestimado os números de focos nessa classe.

Queimada-anterior: Eram esperadas baixas porcentagens de focos de queimadas nessa classe, considerando que eles não deveriam ocorrer em áreas previamente queimadas. Foram verificadas baixas porcentagens de focos até meados de setembro, inferior a 9%. No entanto, a partir desta data, esses valores aumentaram, atingindo o máximo de 28% no início de outubro. Esses valores não eram esperados, sendo explicados pelas mesmas considerações feitas para a classe *Queimada*.

Cerrado-Amarelo: A porcentagem de focos de queimadas aumentou ao longo do período de estudo, atingindo o máximo de 40% em meados de setembro e diminuindo nas datas seguintes. Os valores encontrados foram quase sempre inferiores aos da classe *Cerrado-Marrom*, com exceção de meados de setembro a início de outubro. Esses resultados indicaram que o algoritmo discriminou satisfatoriamente as áreas com boas condições de inflamabilidade, porém com menor quantidade de combustível do que a classe *Cerrado-Marrom*, concordando com a susceptibilidade média atribuída à mesma.

Cerrado-Marrom: A porcentagem de focos dessa classe manteve-se acima de 21%, superior às demais classes, durante praticamente todo o período de estudo, chegando ao máximo de 73% do Cerrado no final de julho. De fato, era esperado que a maior parte dos focos de queimadas ocorresse nessa classe, uma vez que foi associada com a maior quantidade de combustível vegetal e alta susceptibilidade ao fogo.

Considerando as características das classes e os resultados obtidos, principalmente o número de focos de queimadas por classe, sugere-se, mediante futuras alterações no algoritmo, a união das classes *Cerrado-Amarelo* e *Cerrado-Marrom* na classe *Cerrado*, constituindo a classe de cobertura vegetal de mais elevada susceptibilidade ao fogo. Nessas duas classes ocorreram 72% dos 11.190 focos de queimadas ocorridos no período de estudo, ocupando uma área entre 45 a 83% do total do Cerrado. Da mesma forma, as classes *Queimada* e *Queimada-anterior* também poderiam ser reunidas, constituindo uma única classe *Queimada*, de susceptibilidade média, pois foi constatado que elas podem ser um bom indicador da presença de combustível vegetal nas áreas adjacentes às áreas queimadas previamente. Portanto, restariam três classes de susceptibilidade: baixa para a classe *Água-Nuvem* e *Cerrado-Verde*; média para *Queimada* e *Cultura*; e alta para *Cerrado*.

3.4 - Conclusões

Foi proposto um novo método para estimar a susceptibilidade ao fogo da vegetação do Cerrado utilizando mosaicos de imagens do AVHRR/NOAA-14. O método foi avaliado pela sobreposição dos mapas de susceptibilidade com os dados de localização de focos de queimadas detectados em imagens do AVHRR/NOAA-12. Os resultados indicaram a possibilidade de determinação de sete classes de cobertura vegetal na área de estudo utilizando mosaicos do IVDN e do canal 3. A cada classe foi atribuído um grau de susceptibilidade ao fogo, variando entre muito baixo, baixo, médio e alto. As classes com susceptibilidade ‘média’ e ‘alta’ foram satisfatoriamente delimitadas, possibilitando a identificação das áreas com maior disponibilidade de combustível vegetal, onde ocorreram

72% dos 11.190 focos de queimadas ocorridos no período de estudo. Problemas na classificação encontrados principalmente nas classes com susceptibilidade ‘muito baixa’ e ‘baixa’ foram atribuídos à resolução espacial grosseira de 1,5 km dos mosaicos AVHRR, bem como aos erros de registro dos focos de queimadas e dos mosaicos e também às características espectrais das classes.

Queimadas em vegetação do Cerrado ocorrem sob três condições simultâneas: a) existência de combustível vegetal; b) condições meteorológicas propícias; c) ação humana para iniciar o fogo. Considerando que o enfoque deste trabalho é baseado na presença de combustível vegetal, os resultados da estimativa da susceptibilidade ao fogo devem melhorar com a inclusão de componentes meteorológicos e antrópicos. Sugere-se também que dados de novos sensores, especialmente o ‘Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer’ (MODIS), a bordo das plataformas Terra e Aqua, sejam testados para delimitar classes de susceptibilidade ao fogo no Cerrado, pois o mesmo tem resolução temporal adequada, de 1 a 3 dias, melhor resolução espectral com 36 canais e melhor resolução espacial com 250m, 500m e 1km, quando comparado com o AVHRR/NOAA.

Referências

- ALHO, C.J.R.; MARTINS, E.S. 1995. **De grão em grão, o Cerrado perde espaço - Cerrado: impactos do processo de ocupação**. Brasília: Fundo Mundial para a Natureza (WWF).
- ALMEIDA, S.A.O. 1997. **Determinação da redução de umidade superficial na região dos Cerrados com imagens AVHRR/NOAA e precipitação pluviométrica**. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília (UnB), Brasília.
- ASSAD, E.D.; EVANGELISTA, B.A. 1994. Análise freqüencial da precipitação pluviométrica. In: **Chuva no Cerrado: análise e espacialização**. Ed. E.D. Assad. Brasília: EMBRAPA-CPAC. p. 25-42.
- BURGAN, R.E. 1996. Use of remotely sensed data for fire danger estimation. **EARSeL Advances in Remote Sensing**. 4(4):01-24.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J.; II, F.M. 1996. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. **Computers & Graphics**. 20(3):395-403.
- CASTRO, L.H.R.; MOREIRA, A.M.; ASSAD, E.D. 1994. Definição e regionalização dos padrões pluviométricos dos Cerrados brasileiros. In: **Chuva no Cerrado: análise e espacialização**. Ed. E.D. Assad. Brasília: EMBRAPA-CPAC. p. 13-23.

- CHUVIECO, E.; MARTIN, M.P. 1994. Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. 60(5):563-570.
- CONSERVATION INTERNATIONAL [CI]. 2002. **Hotspots**. Disponível em: <<http://www.conservation.org.br>>. Acesso em agosto/2002.
- COUTINHO, L.M. 1990. Fire in the ecology of the Brazilian cerrado. In: **Fire in the tropical biota**, Ed. J.G. Goldammer. New York: Springer-Verlag. p. 82-105.
- COUTINHO, L.M. 2000. **Cerrado**. Disponível em: <<http://eco.ib.usp.br/cerrado>>. Acesso em agosto/2002.
- CRUTZEN, P.J.; ANDREAE, M. O. 1990. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**. 250:1669-1678.
- DIAS, B.F.S. 1996. Cerrados: uma caracterização. In: **Alternativas de desenvolvimento dos cerrados: manejo e conservação dos recursos naturais renováveis**. Ed. Dias, B.F.S. Brasília: Fundação Pró-Natureza (FUNATURA). p. 11-25.
- DIVISÃO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS / INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (DPI/INPE). 2002. **SPRING**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring>>. Acesso em maio/2002.
- EVA, H.; LAMBIN, E.F. 1998a. Burnt area mapping in Central Africa using ATSR data. **International Journal of Remote Sensing**. 19(18):3473-3497.
- EVA, H.; LAMBIN, E.F. 1998b. Remote sensing of biomass burning in tropical regions: sampling issues and multisensor approach. **Remote Sensing of Environment**. 64:292-315.
- FOREST SERVICE (FS). 2001. **Wildland Fire Assessment System**. Disponível em: <<http://www.fs.fed.us/land/wfas>>. Acesso em agosto/2002.
- FRANÇA, H. 1994. **Um estudo fenológico com imagens AVHRR/NOAA nos Cerrados do Parque Nacional das Emas, GO**. Dissertação (Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos. (INPE-6120-TDI/581).
- FRANÇA, H. 2000. **Metodologia de identificação e quantificação de áreas queimadas no Cerrado com imagens AVHRR/NOAA**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.
- FRANÇA, H.; SETZER, A.W. 1998. AVHRR temporal analysis of a savanna site in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**. 19(16):3127-3140.
- HOLBEN, B.N. 1986. Characteristics of maximum-value composite imagens from temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**. 7(11):1417-1434.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 1993. **Mapa de Vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE. Escala 1:5.000.000.
- JUSTICE, C.O.; TOWNSHEND, J.R.G.; HOLBEN, B.N.; TUCKER, C.J. 1985. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. **International Journal of Remote Sensing**. 6:1271-1318.
- KAUFMAN, Y.J.; REMER, L.A. 1994. Detection of forests using mid-IR reflectance: an application for aerosol studies. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. 32:672-683.
- KOGAN, F.N.; CAREY, R.M.; FORSYTH, D. 2001a. **Vegetation and Temperature Condition Index (VT) Home Pages**. Disponível em: <<http://orbit-net.nesdis.noaa.gov/crad/sat/surf/vci/index.html>>. Acesso em junho/2002.
- KOGAN, F.N.; CAREY, R.M.; FORSYTH, D. 2001b. **Experimental Fire potential product**. Disponível: <<http://orbit-net.nesdis.noaa.gov/crad/sat/surf/fpm/index.html>>. Acesso em junho/2002.
- MISTRY, J. 1998a. Fire in the cerrado (savannas) of Brazil: an ecological review. **Progress in Physical Geography**. 22(4):425-448.
- MISTRY, J. 1998b. Decision-making for fire use among farmers in savannas: an exploratory study in the Distrito Federal, central Brazil. **Journal of environmental Management**. 54:321-334.
- MOREIRA, A. 1996. Proteção contra o fogo e seu efeito na distribuição e composição de espécies de cinco fisionomias de cerrado. In: **Impactos de queimadas em áreas de cerrado e restinga**. Ed. H.S.Miranda, C.H.Saito, B.F.S.Dias. Brasília: Departamento de Ecologia / Universidade de Brasília (ECL/UnB). p 112-121.
- MUELLER-DUMBOIS, D.; GOLDAMMER, J.G. 1990. Fire in the tropical ecosystems and global environmental change: an introduction. In: **Fire in the tropical biota**. Ed. J.G. Goldammer. New York: Springer-Verlag. p. 1-10.
- NIMER, E.; BRANDÃO, A.M.P.M. 1989. **Balanco hídrico e clima da Região dos Cerrados**. Rio de Janeiro: IBGE.
- PALTRIDGE, G.W.; BARBER, J. 1988. Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA/AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**. 25: 381-394.
- PEREIRA JR., A. C. 1992. **Monitoramento de queimadas na região dos Cerrados com utilização de dados AVHRR/NOAA corrigidos com dados TM/Landsat**. Dissertação (Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos. (INPE-5490-TDI/507).

- PEREIRA, J.A.R.; SETZER, A. 2001. Brazilian Validation of AVHRR fire pixels. In: **Global and regional vegetation fire monitoring from space: planning a coordinated international effort**. Ed. F. Ahern, J.G. Goldammer, C. Justice. Netherlands: Academic Publishing.
- PEREIRA, M.C. 1987. **Detecção, monitoramento e análise de alguns efeitos ambientais de queimadas na Amazônia através da utilização de imagens dos satélites NOAA e Landsat, e dados de aeronave**. Dissertação (Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos. (INPE-4503-TDL/326).
- PEREIRA, M.C.; SETZER, A.W. 1993. Spectral characteristics of deforestation fires in NOAA/AVHRR images. **International Journal of Remote Sensing**. 14(3):583-597.
- PIVELLO, V.R.; NORTON, G.A. 1996. FIRETOOL: an expert system for the use of prescribed fire in Brazilian savannas. **Journal of Applied Ecology**. 33:348-356.
- RAMOS NETO, M.B. 2000. **O Parque Nacional de Emas (GO) e o fogo: implicações para a conservação biológica**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.
- RIBEIRO, J.F.; WALTER, B.M.T. 1998. Fitofisionomias do Cerrado. In: **Cerrado: Ambiente e Flora**. Ed. S.M. Sano e S.P. Almeida. Planaltina: EMBRAPA/CPAC. p. 89-166.
- RONDE, C.; GOLDAMMER, J.G.; WADE, D.D.; SOARES, R.V. 1990. Prescribe fire in industrial plantations. In: **Fire in the tropical biota**. Ed. J.G Goldammer, Berlim: Springer-Verlag. p. 216-272.
- TOWNSHEND, J.R.G.; JUSTICE, C.O.; KALB, V. 1987. Characterization and classification of South American land cover types using satellite data. **International Journal of Remote Sensing**. 8:1189-1207.
- TUCKER, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**. 8:127-150.
- TUCKER C.J.; SELLERS, P.J. 1986. Satellite remote sensing of primary production. **International Journal of Remote Sensing**. 7(11):1395-1416.
- TURNER, J.A.; LILLYWHITE, J.W.; PIESLAK, Z. 1961. **Forecasting for forest fire services**. Technical Note No. 42. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO).

4 - SUSCEPTIBILIDADE DA VEGETAÇÃO DO CERRADO AO FOGO EM RELAÇÃO À DISTÂNCIA DA MALHA VIÁRIA E DE FOCOS DE QUEIMADAS

Resumo

Alta incidência de queimada de origem antrópica ocorre no Cerrado, sobretudo na estação seca. Foi verificada a susceptibilidade da vegetação do Cerrado ao fogo em relação à fonte de ignição, considerando que sua origem é antrópica. Para tanto, foi analisada a distância entre focos de queimadas e dois indicadores de atividade antrópica: malha viária e focos de queimadas ocorridos em dias anteriores. Foram utilizados dados da malha viária principal do Cerrado e de localização de focos de incêndios detectados em imagens do canal 3 (3,7 μm , infravermelho termal) do 'Advanced Very High Resolution Radiometer / National Oceanic and Atmospheric Administration' - 12 (AVHRR/NOAA-12). Os resultados mostraram que quanto mais próximo dessas atividades antrópicas maior foi a incidência de queimadas. Observou-se que 24% dos focos de queimadas ocorreram em uma faixa de 10 km ao longo da malha viária e de 10 km no entorno dos focos de queimadas ocorridos no dia anterior. A área ao longo da malha viária correspondeu a 582 mil km^2 , cerca de 27% da área total do Cerrado, enquanto que a área média no entorno dos focos dos dias anteriores foi de 33 mil km^2 , equivalente a 2% do Cerrado. Os resultados mostraram que esses indicadores de atividade antrópica podem ser utilizados na relação com a susceptibilidade da vegetação do Cerrado ao fogo. Considerando os aspectos de prevenção de queimadas, a utilização de dados de focos de queimadas ocorridos em dias anteriores pode ser mais adequada, pois eles abrangem uma área menor resultando em menor deslocamento de pessoal e equipamento para prevenção do fogo.

4.1- Introdução

A ocupação do Cerrado teve início no século XVIII com a exploração do ouro e pedras preciosas. Com o esgotamento das minas, a principal atividade econômica na região passou a ser a pecuária bovina extensiva realizada em pastagens naturais, situação que perdurou até o final da década de 60. A partir da construção de Brasília e devido aos incentivos governamentais aplicados no setor agropecuário, expandiu-se a ocupação da região com culturas agrícolas e bovinocultura em pastagem implantada, fazendo do Cerrado a maior região produtora de grãos do Brasil (ALHO & MARTINS, 1995). A pecuária extensiva ocupa atualmente cerca de 60% da área do Cerrado e a cultura intensiva de grãos, principalmente soja, cerca de 6%, com 65% a 80% do Cerrado já modificados pelo homem devido à expansão agropecuária e urbana (MANTOVANI & PEREIRA, 1998; CONSERVATION INTERNATIONAL [CI], 2002).

Embora seja um evento natural no Cerrado, o fogo passou a ser utilizado pelo homem pré-colombiano em diferentes atividades como caça, guerra, manejo de vegetação e limpeza

de áreas (ANDERSON & POSEY, 1985; COUTINHO, 1990). Atualmente, apesar da aplicação de modernas técnicas na agropecuária, as principais causas de queimadas são devido ou uso do fogo para renovação e limpeza de pastagens, bem como na abertura e limpeza de áreas agrícolas (COUTINHO, 1990; 2000; MISTRY, 1998a, 1998b), sendo estimado que cerca de 20 a 30% do Cerrado são queimados anualmente (COUTINHO, 1990; FRANÇA, 2000). Essa elevada incidência de queimadas tem sido relacionada com efeitos prejudiciais ao ambiente, tais como: redução da biodiversidade; empobrecimento do solo pela perda de nutrientes; erosão do solo pela sua maior exposição à chuva (ALHO & MARTINS, 1995; MUELLER-DUMBOIS & GOLDAMMER, 1990); poluição no âmbito local, como a causada pelo O₃ resultante de emissão de CO, NO_x, hidrocarbonetos; mudanças climáticas regionais; mudança climática em escala global devido ao efeito estufa decorrente da emissão de CO₂ e CH₄ (CRUTZEN & ANDREAE, 1990; MUELLER-DUMBOIS & GOLDAMMER, 1990); etc. Por outro lado, a completa supressão do fogo no Cerrado também acarreta efeitos ambientais, como a redução de biodiversidade e o aumento da densidade de plantas lenhosas com alteração na composição florística e fisionômica da vegetação (PIVELLO & NORTON, 1996; MOREIRA, 1996).

Três condições simultâneas são necessárias para que uma queimada ocorra em vegetação: a) condições meteorológicas propícias; b) disponibilidade de combustível vegetal; c) existência de fonte de ignição. As condições meteorológicas da estação chuvosa no Cerrado propiciam o crescimento e acúmulo de material vegetal, enquanto que as do período de estiagem secam a maior parte desse material, formado principalmente por gramíneas (OLIVEIRA, 1998; RAMOS NETO, 2000). FRANÇA (2000) relatou que cerca de 70 a 75% da área queimada no Cerrado ocorreram no período seco, sendo as atividades antrópicas sua principal causa, conforme relatado anteriormente (COUTINHO, 1990; 2000; MISTRY, 1998a; 1998b).

Atualmente, tem sido atribuída maior importância à prevenção do que à supressão do fogo, uma vez que é mais fácil evitar uma queimada ou combatê-la no início do que quando estabelecida e em propagação (SOARES, 1985). O conhecimento da susceptibilidade ao fogo possibilita o planejamento de medidas preventivas, otimizando a alocação de recursos pela melhor relação custo/benefício, em comparação com as medidas supressivas (SOARES, 1985). Medidas preventivas em âmbito local podem ser tomadas para reduzir as ocorrências de incêndio em função da susceptibilidade: maior vigilância nas áreas de maior susceptibilidade; restrição de acesso a esses locais; construção de aceiros preventivos; reorganização das práticas de manejo agropecuário. Também podem ser tomadas medidas

auxiliares para o combate inicial ao fogo, como construção de estradas de acesso rápido aos locais de maior susceptibilidade e alocação de recursos em pontos estratégicos (FERRAZ & VETTORAZZI, 1998). Em âmbito regional, os índices de susceptibilidade ao fogo podem ser utilizados no manejo da vegetação do Cerrado. Uma vez conhecido o grau de susceptibilidade numa região, poderiam ser emitidos alertas para as áreas onde é maior, incluindo aquelas destinadas à preservação e seu entorno, onde seriam tomadas medidas preventivas. Por outro lado, seriam localizadas as áreas de menor susceptibilidade, onde o uso do fogo controlado poderia ser autorizado.

Entre os índices de susceptibilidade ao fogo existem os que utilizam somente dados meteorológicos e aqueles que também incorporam dados vegetacionais e antrópicos. Os parâmetros meteorológicos relacionados à umidade da vegetação variam em curto prazo de tempo, sendo de caráter diário. Índices de susceptibilidade mais antigos utilizam apenas esses dados (SOARES, 1985). Além dos dados meteorológicos, os índices mais atuais utilizam estimativas da umidade da vegetação obtidas com base em imagens de sensores orbitais. Os índices que utilizam simultaneamente múltiplos parâmetros tiveram impulso com o advento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que permitiram a utilização de dados de naturezas diversas com maior resolução espacial e temporal. Além dos dados meteorológicos e imagens de sensores orbitais utilizados para estimar a umidade da vegetação, foram incorporados parâmetros de longo prazo, de caráter anual ou permanente, como por exemplo: tipo de vegetação; tipo e quantidade de combustível vegetal; padrões meteorológicos sazonais; declividade; exposição solar; uso da terra; malha viária; restrições de acesso; rede de aceiros; densidade populacional; padrões de distribuição espaço-temporal das queimadas (PIVELLO & NORTON, 1996; CHUVIECO *et al.*, 1997; FERRAZ & VETTORAZZI, 1998).

4.2 - Objetivo

O objetivo deste trabalho foi avaliar a relação entre a susceptibilidade da vegetação do Cerrado ao fogo e a proximidade de indicadores atividade antrópica: malha viária e focos de queimadas ocorridos anteriormente.

Foi considerado que a probabilidade de ocorrência de queimadas em um determinado local é inversamente proporcional à distância dos dois indicadores de atividades antrópicas aqui analisados. As queimadas estariam próximas à malha viária, pois esta seria o principal meio de acesso às áreas de atividades agropecuárias, nas quais o fogo é largamente utilizado como prática de manejo. Os focos recentes de queimadas indicariam locais e períodos com as

três condições necessárias à ocorrência de queimadas — condições meteorológicas propícias, disponibilidade de combustível vegetal e existência de fonte de ignição.

4.3 - Materiais e Método

4.3.1 - Área de estudo

A área de estudo foi a mesma utilizada por PEREIRA JR. (1992) e FRANÇA (2000), segundo interpretação do Mapa de Vegetação do Brasil produzido pelo INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA ([IBGE], 1993). Ela abrange a porção contínua da Região Fitoecológica do Cerrado definida como ‘Savana’ no Mapa de Vegetação, junto com as áreas de ‘Tensão Ecológica’, que indicam o contato entre Cerrado e outros tipos de vegetação. Enclaves de ‘Floresta’ ou Caatinga, definida como ‘Savana Estépica’, também estão incluídos. A área incluiu tanto as regiões de cobertura vegetal natural quanto as antropizadas. A área de estudo ocupa 2 200 000 km², cobrindo cerca de um quarto do território brasileiro, entre os paralelos 02°30’S e 26°00’S e os meridianos 41°45’O e 62°00’O, abrangendo a totalidade do Distrito Federal, a maior parte dos estados de Goiás, Tocantins e Mato Grosso do Sul, e parte dos estados de Mato Grosso, Maranhão, Piauí, Minas Gerais, Bahia, São Paulo, Rondônia, Pará e Paraná (Figura 4.1).

A cobertura vegetal natural predominante da área de estudo é o Cerrado *lato sensu*, caracterizada por seus diferentes tipos fitofisionômicos, que apresentam um gradiente de densidade de árvores, dispersas sobre um estrato herbáceo-arbustivo, geralmente formado por gramíneas (COUTINHO, 1990, 2000; RIBEIRO & WALTER, 1998).

O clima predominante é tropical-quente-subúmido (Aw), caracterizado por forte sazonalidade das chuvas e estabilidade da temperatura média diária (DIAS, 1996). A precipitação média anual varia de 600 a 2000 mm, com 75% da área do Cerrado com valores entre 1000 e 1600 mm (ASSAD & EVANGELISTA, 1994), com 5 a 10% ocorrendo no período de estiagem, de maio a setembro (CASTRO *et al.*, 1994). Durante a estiagem existem as melhores condições meteorológicas para dessecação e queima do estrato herbáceo. As temperaturas mais elevadas ocorrem na primavera-verão, com médias de 20 a 30°C e mais baixas no inverno com valores médios entre 15° e 24°C (NIMER & BRANDÃO, 1989).

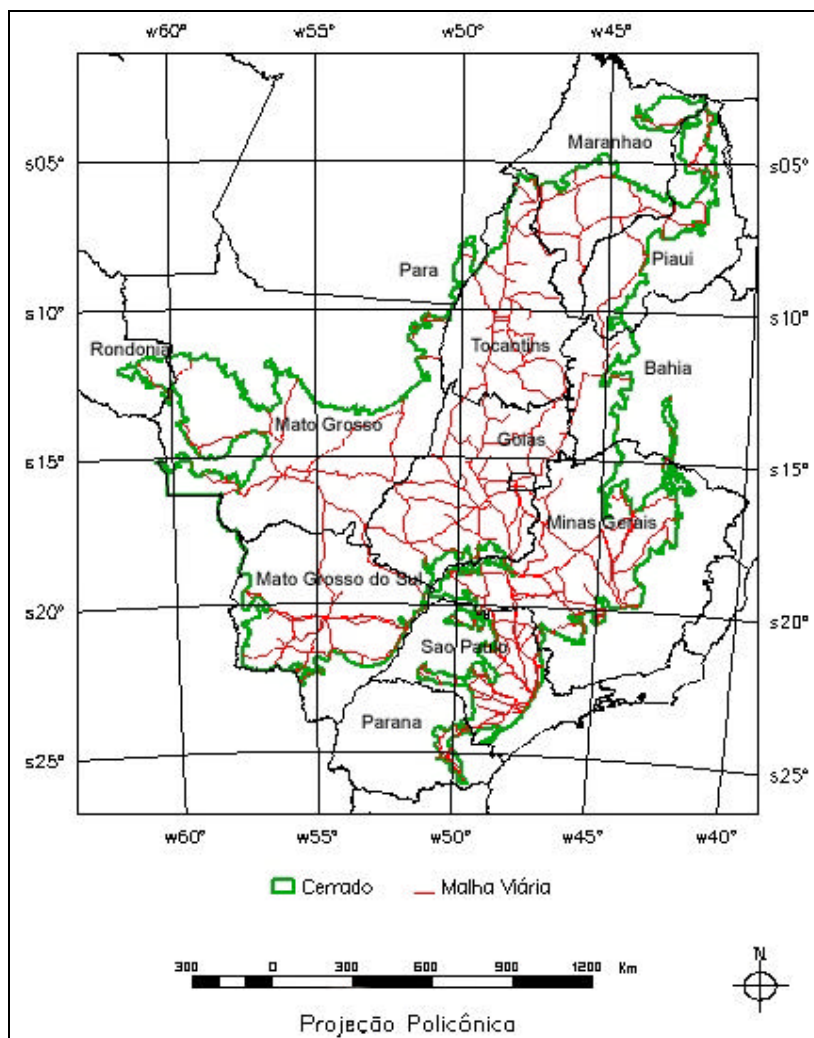


Figura 4.1 – Área de estudo com extensão de 2.200.000 km² com a malha viária principal do Cerrado.
 Fonte: adaptado de PEREIRA JR. (1992) e FRANÇA (2000).

4.3.2 - Materiais

Para processamento dos dados georreferenciados foi utilizado o Sistema de Informações Geográficas (SIG) SPRING 3.5 para ambiente Windows (CÂMARA *et al.*, 1996; DIVISÃO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS / INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAS [DPI/INPE], 2002).

Foram usados dados diários das coordenadas geográficas dos focos de queimadas detectados no período de maio a outubro/98 nas imagens do canal 3 (3,7 μ m, infravermelho termal) do sensor ‘Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) a bordo do satélite National Oceanic and Atmospheric Administration’ - 12 (NOAA-12), passagem vespertina (21h30 GMT). Os dados foram gerados pela Divisão de Satélites Ambientais (DSA) do INPE,

baseado no método descrito por PEREIRA (1987) e PEREIRA & SETZER (1993), com acurácia de 2 km conforme PEREIRA & SETZER (2001). Foi utilizada a malha viária principal do Cerrado — rodovias e ferrovias — fornecida em formato digital pelo IBGE (1997).

4.3.3 - Método

4.3.3.1 - Processamento dos dados de malha viária

A malha viária incorporada ao SIG permitiu gerar uma grade numérica regular de distância (Figura 4.2). Uma grade numérica regular é uma matriz numérica na qual os pontos estão espaçados por uma distância fixa denominada resolução espacial. O valor numérico de um ponto da grade corresponde à menor distância deste ponto até a malha viária. A resolução da grade de distância foi de 2,5 km.

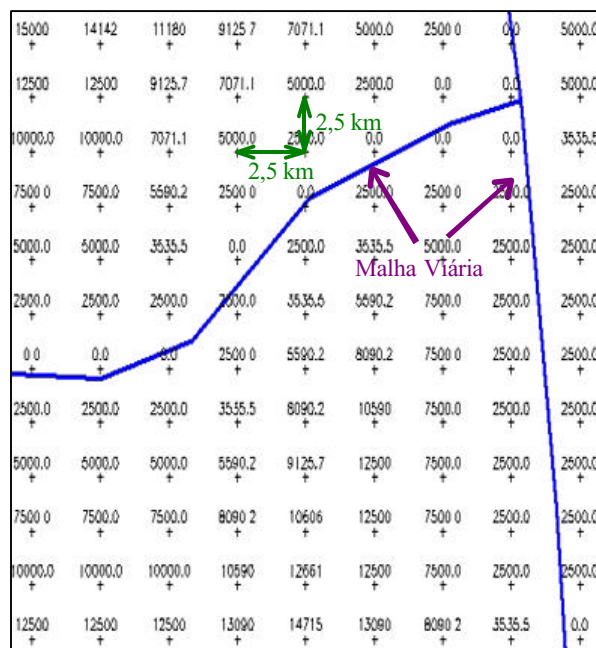


Figura 4.2 – Detalhe da grade numérica regular de distância, com resolução de 2,5 km, gerada da malha viária. Os valores indicam a menor distância em metros de um ponto da grade até a malha viária. Região centrada em 12o45'S / 49o15'O.

Foi aplicada a operação ‘fatiamento’ do SIG na grade de distância da malha viária para obtenção de um mapa de classes de distância. O ‘fatiamento’ consiste em associar os valores numéricos dos pontos da grade a intervalos (‘fatias’) que correspondem às classes de distância da malha viária (Figura 4.3). A etapa seguinte foi o cálculo da área de cada classe no Cerrado.

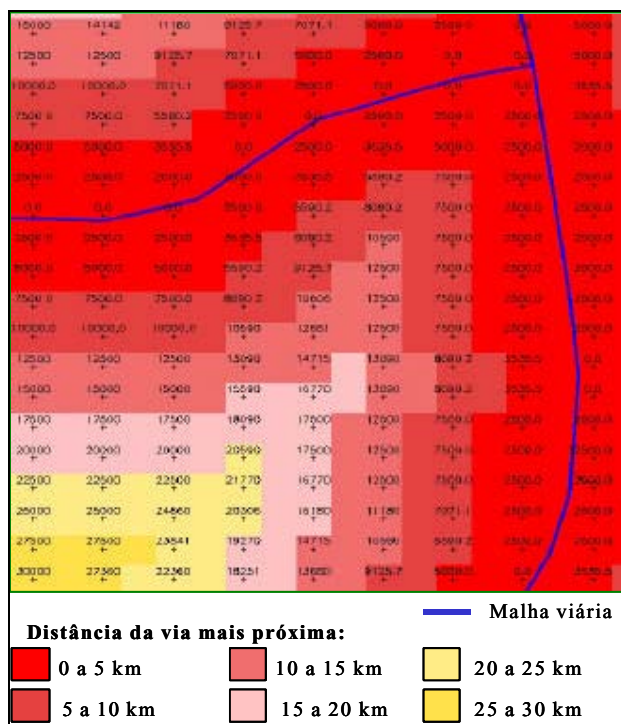


Figura 4.3 – Detalhe do mapa de classes de distância da malha viária sobreposto pela grade de distância que o gerou. Região centrada em 12°45'S / 49°15'O.

4.3.3.2 - Processamento dos dados de focos de queimadas

Os dados de focos de queimadas foram incorporados ao SIG e selecionados os das passagens do NOAA-12 com maior recobrimento do Cerrado. Esse procedimento resultou na seleção de dados de focos de queimadas de duas passagens orbitais por quinzena, totalizando 24 dias no período de maio a outubro/98. Estes focos são referidos no texto como **focos atuais** (Tabela 4.1). Foram também selecionados os dados de focos de queimadas do dia anterior, que são referidos no texto como **focos da véspera** (Tabela 4.1). Por exemplo, os focos do dia 08/maio são focos atuais, enquanto os do dia 07/maio são os focos da véspera.

Tabela 4.1 – Dias selecionadas com focos atuais e com focos da véspera, no período de maio a outubro/1998.

	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro
Dias com focos atuais	08, 13, 22, 26	04, 09, 18, 22	01, 06, 20, 29	03, 12, 16, 21	03, 12, 17, 26	01, 05, 19, 23
Dias com focos da véspera	07, 12, 21, 25	03, 08, 17, 21, 30	05, 19, 28	02, 11, 15, 20	02, 11, 16, 25, 30	04, 18, 22

Com base nos focos da véspera foram geradas grades regulares de distância, com resolução espacial de 2,5 km. O valor de cada ponto da grade correspondeu à distância até o foco de queimada mais próximo (Figura 4.4). Esse procedimento resultou em 24 grades de distância dos focos da véspera, uma para cada dia.

A aplicação da operação ‘fatiamento’ nessas grades gerou 24 mapas de classes de distância dos focos da véspera (Figura 4.5). Os intervalos de distância utilizados no ‘fatiamento’ foram os mesmos que os da malha viária, resultando nas mesmas classes. Em seguida, foi calculada a área das classes em cada data e a área média das mesmas no período de estudo.

Os focos de queimadas foram considerados como verdade de campo em relação à incidência de queimadas em vegetação do Cerrado, indicando as regiões e as datas em que foram satisfeitas as três condições necessárias para a ocorrência de fogo.

4.3.3.3 – Sobreposição dos focos de queimadas atuais com os mapas de distância

O número de focos atuais ocorridos em cada classe de distância foi calculado para as 24 datas. Isso foi realizado por meio da sobreposição entre os focos atuais e os mapas de distância. Em relação à malha viária, a sobreposição foi entre o mapa de distância da malha viária e os focos atuais (Figura 4.6). Para os focos da véspera, a sobreposição foi entre os mapas de distância dos focos da véspera e os focos atuais (Figura 4.7).

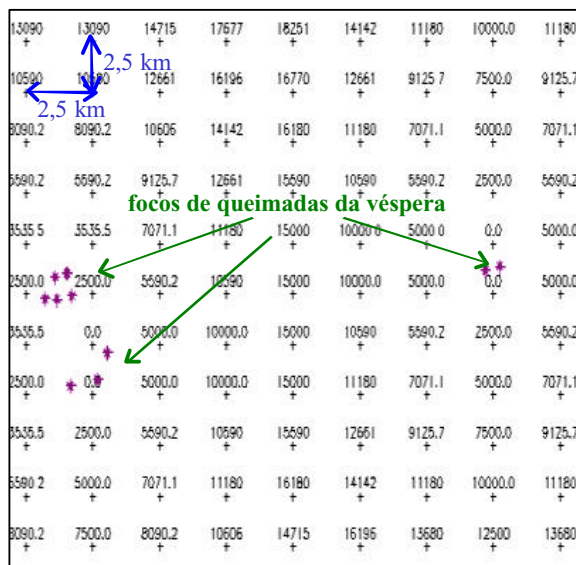


Figura 4.4 – Detalhe da grade numérica regular de distância, com resolução de 2,5 km, gerada com base nos focos de queimada do dia 20/agosto/1998. Os valores indicam a distância em metros de um ponto da grade até o foco de queimada mais próximo. Região centrada em $12^{\circ}45'S / 49^{\circ}15'O$.

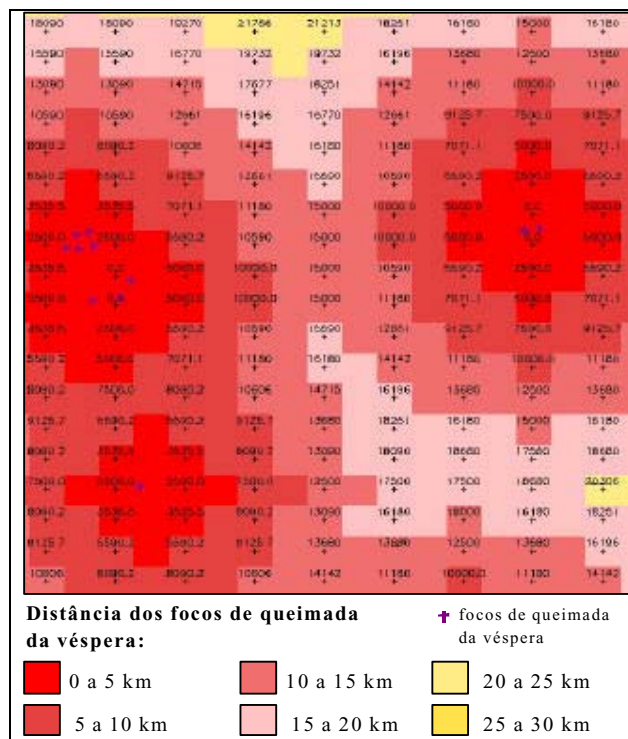


Figura 4.5 – Detalhe do mapa de classes de distância dos focos do dia 20/agosto/1998 sobreposto pela grade de distância que o gerou. Região centrada em $12^{\circ}45'S / 49^{\circ}15'O$.

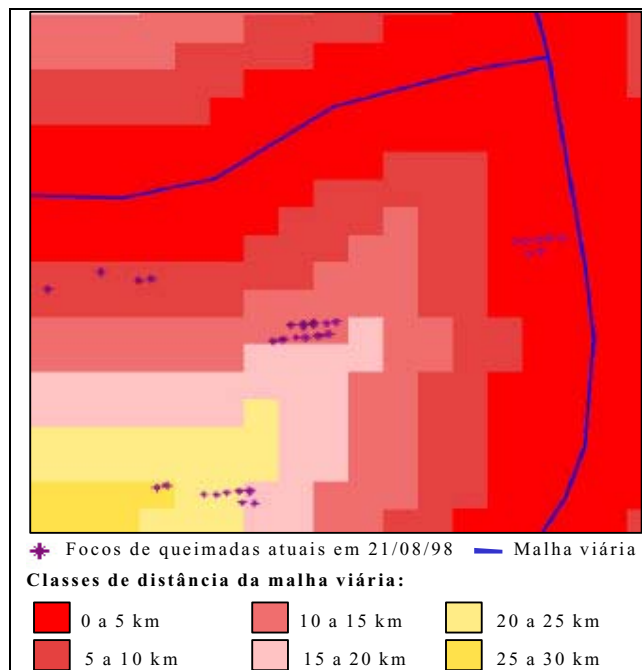


Figura 4.6 – Detalhe da sobreposição entre os focos de queimadas atuais (21/agosto/1998) e o mapa de classes de distância da malha viária. Região centrada em 12°45'S / 49°15'O.

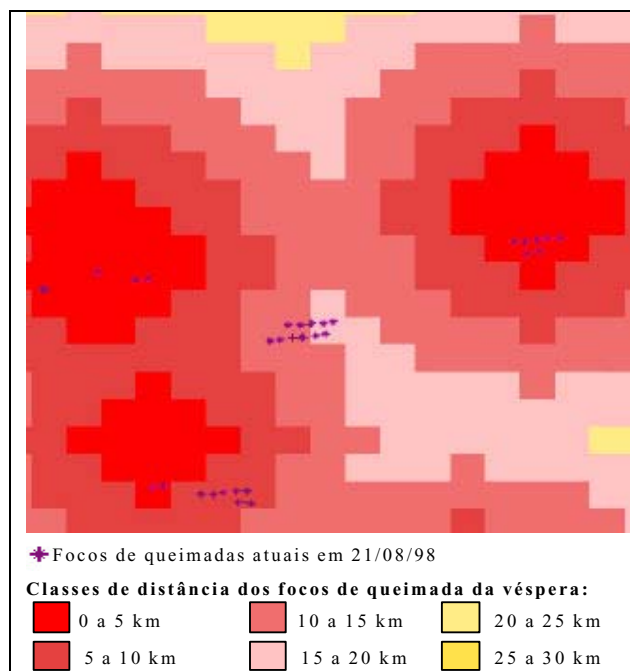


Figura 4.7 – Detalhe da sobreposição entre os focos de queimadas atuais (21/agosto/1998) e o mapa de classes de distância dos focos de queimadas da véspera (20/agosto/1998). Região centrada em 12°45'S / 49°15'O.

4.4 - Resultados e Discussão

4.4.1 – Geração dos mapas de distância

As grades de distância foram geradas com resolução espacial de 2,5 km, compatível com o erro de posicionamento dos focos de queimada de cerca de 2 km (PEREIRA & SETZER, 2001). Isso implica que a opção por uma resolução maior não resultaria em maior acurácia no posicionamento dos focos atuais nos mapas de distância. Além disso, aumentaria o tempo de processamento para geração das grades e dos mapas de distância, e da sobreposição destes com os focos atuais.

A aplicação do ‘fatiamento’ do SIG gerou o mapa de classes de distância da malha viária, representado na Figura 4.8, e os 24 mapas de classes de distância dos focos da véspera, um dos quais está na Figura 4.9.

As classes de distância da malha viária e suas áreas estão descritas na Tabela 4.2, enquanto as dos focos da véspera estão na Tabela 4.3. Com relação à distância da malha viária, as classes mais próximas ocuparam as maiores áreas, com tendência de decréscimo do tamanho para as classes mais distantes. Por outro lado, em relação à distância dos focos da véspera, as classes mais próximas foram as menores, com tendência de aumento do tamanho até a classe 40-45 km. Esses resultados foram devido à geometria associada às classes de distância dos indicadores.

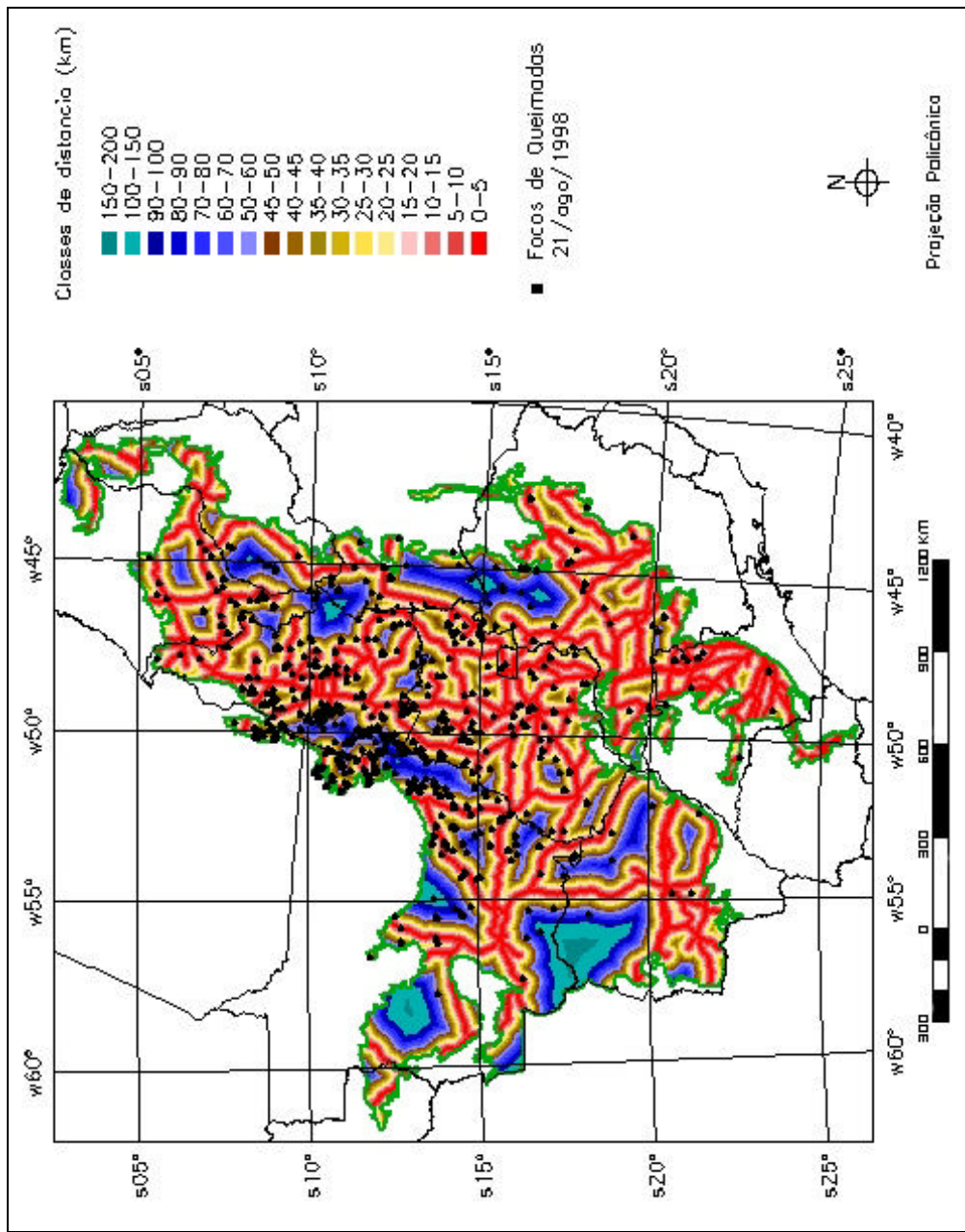


Figura 4.8 – Mapa de classes de distância da malha viária junto com os focos de queimadas atuais (21/agosto/1998), no Cerrado.

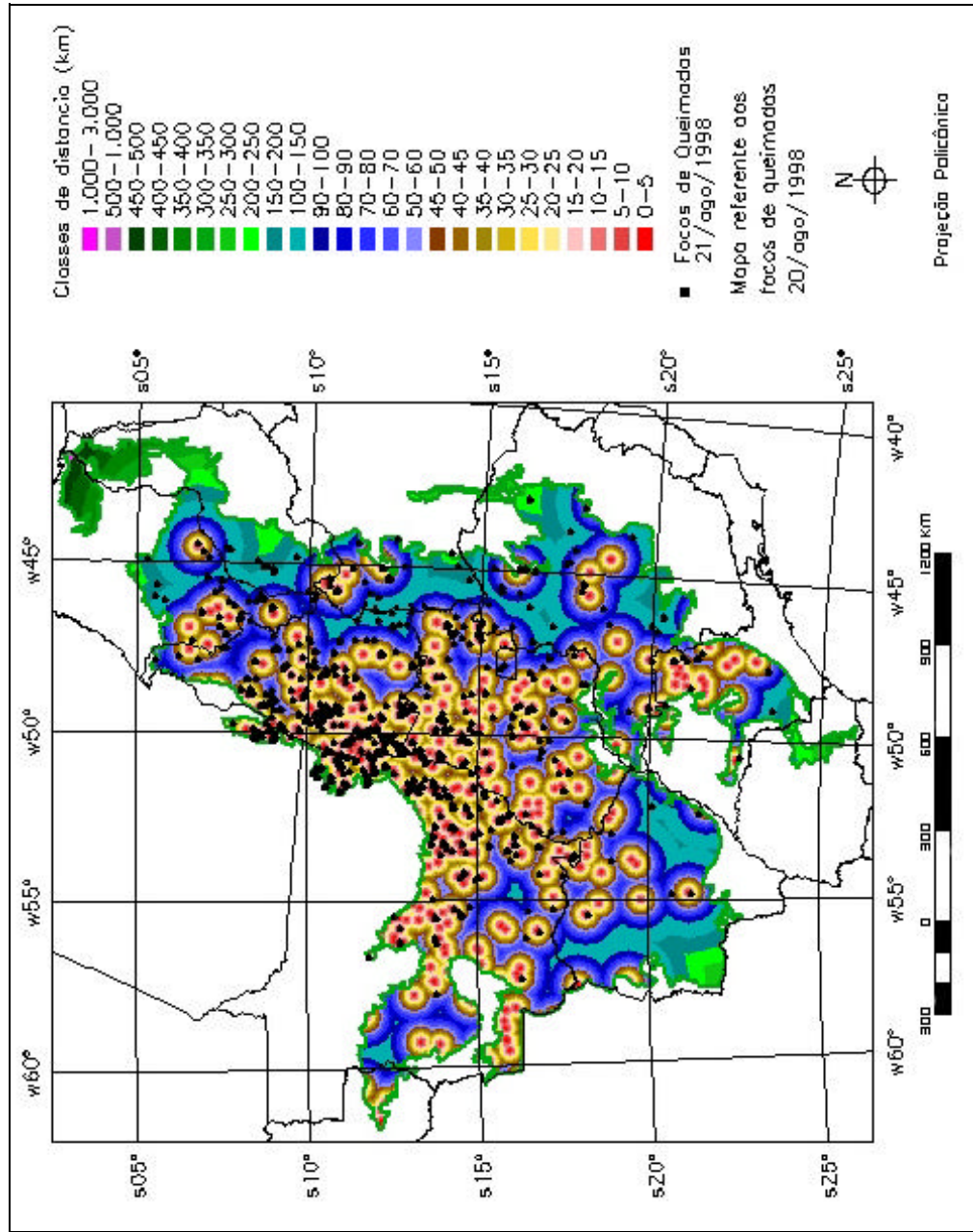


Figura 4.9 – Mapa de classes de distância dos focos de queimadas da véspera (20/ago/1998) junto com focos de queimadas atuais (21/ago/1998), no Cerrado.

Tabela 4.2 – Área ocupada no Cerrado pelas classes de distância da malha viária.

Classe de distância da malha viária (km)	Área da classe de distância da malha viária			
	Área (km ²)	Porcentagem (%)	Área acumulada (km ²)	Porcentagem acumulada (%)
0 - 5	337.194	15,7	337.194	15,7
5 - 10	244.975	11,4	582.169	27,1
10 - 15	230.175	10,7	812.344	37,8
15 - 20	192.375	9,0	1.004.719	46,8
20 - 25	176.344	8,2	1.181.063	55,0
25 - 30	139.750	6,5	1.320.813	61,5
30 - 35	123.219	5,7	1.444.031	67,2
35 - 40	107.313	5,0	1.551.344	72,2
40 - 45	92.225	4,3	1.643.569	76,5
45 - 50	75.244	3,5	1.718.813	80,0
50 - 60	121.788	5,7	1.840.600	85,7
60 - 70	90.638	4,2	1.931.238	89,9
70 - 80	66.494	3,1	1.997.731	93,0
80 - 90	46.756	2,2	2.044.488	95,2
90 - 100	29.656	1,4	2.074.144	96,6
100 - 150	65.263	3,0	2.139.406	99,6
150 - 200	7.719	0,4	2.147.125	100,0

Tabela 4.3 – Área média ocupada no Cerrado pelas classes de distância dos focos de queimadas da véspera.

Classe de distância dos focos da véspera (km)	Área média da classe de distância dos focos da véspera			
	Área (km ²)	Porcentagem (%)	Área acumulada (km ²)	Porcentagem acumulada (%)
0 - 5	10.273	0,5	10.273	0,5
5 - 10	23.160	1,1	33.433	1,6
10 - 15	36.213	1,7	69.646	3,3
15 - 20	41.982	2,0	111.628	5,3
20 - 25	49.153	2,3	160.780	7,6
25 - 30	50.682	2,4	211.462	10,0
30 - 35	52.418	2,4	263.880	12,4
35 - 40	53.927	2,5	317.807	14,9
40 - 45	54.189	2,5	371.996	17,4
45 - 50	51.853	2,4	423.849	19,8
50 - 60	98.554	4,6	522.404	24,4
60 - 70	92.613	4,3	615.017	28,7
70 - 80	86.542	4,0	701.559	32,7
80 - 90	80.239	3,7	781.797	36,4
90 - 100	74.935	3,5	856.733	39,9
100 - 150	309.266	14,4	1.165.998	54,3
150 - 200	220.251	10,3	1.386.249	64,6
200 - 250	162.335	7,6	1.548.584	72,2
250 - 300	122.862	5,7	1.671.446	77,9
300 - 350	93.112	4,3	1.764.558	82,2
350 - 400	72.668	3,4	1.837.225	85,6
450 - 450	58.768	2,7	1.895.993	88,3
450 - 500	49.641	2,3	1.945.634	90,6
500 - 1.000	180.824	8,4	2.126.458	99,0
1.000 - 3.000	20.623	1,0	2.147.081	100,0

4.4.2 - Sobreposição dos mapas de distância com os focos atuais

A sobreposição dos focos atuais com os mapas de distância — conforme exemplificado na Figura 4.8 para malha viária, e na Figura 4.9 para focos da véspera — permitiu estimar a incidência de focos atuais por classe de distância. Analisando essa incidência nas classes de distância dos dois indicadores de atividades antrópica — malha viária e focos da véspera — foi observado que um maior número de focos atuais ocorreu em locais próximos aos dois indicadores. Em relação à malha viária, 14% dos focos atuais ocorreram na classe de distância de 0 a 5 km e 10% na classe de 5 a 10 km, com tendência de valores percentuais decrescentes até a última classe (Tabela 4.4). Para os focos de queimadas do dia anterior, 12% dos focos atuais ocorreram na classe de distância de 0 a 5 km e 12% na classe de 5 a 10 km, também com tendência de valores percentuais decrescentes até a última classe (Tabela 4.5). Portanto, a incidência dos focos atuais foi maior em locais próximos aos indicadores de atividade antrópica, com tendência de diminuição conforme o aumento da distância. Observou-se que cerca de um quarto dos focos atuais (24%) estava localizados até 10 km de distância de ambos indicadores (Tabelas 4.4 e 4.5), evidenciando que as áreas próximas à malha viária e aos focos da véspera são mais susceptíveis à ocorrência de queimadas.

Observando a porcentagem acumulada da incidência dos focos atuais nas classes de distância em relação à malha viária, 24% dos focos atuais ocorreram até 10 km da mesma, 53% até 25 km, 95% até 80 km, e 100% até 200 km (Tabela 4.4). Para os focos da véspera, 24% de focos de queimadas atuais ocorreram até 10 km dos mesmos, 54% até 35 km, 96% até 250 km e 100% até 1.000 km (Tabela 4.5). A Figura 4.10 ressalta que a curva de porcentagem acumulada de incidência de focos atuais, relativa à distância da malha viária, tem um crescimento mais acentuado que aquela relativa aos focos da véspera. Conforme anteriormente relatado, 24% dos focos atuais ocorreram até 10 km de ambos indicadores antrópicos. Dessa distância em diante, dado um mesmo número de focos atuais, estes ocorreram mais próximos da malha viária do que dos focos da véspera.

Da mesma forma, tomada uma mesma distância em relação a ambos indicadores de atividade antrópica, a incidência de focos foi maior em relação à malha viária do que em relação aos focos da véspera, exceto para distâncias até 10 km dos indicadores, nas quais a incidência de focos atuais foi similar. Foi observado que até 25 km de distância da malha viária ocorreram 53% dos focos atuais, até 50 km ocorreram 80% e até 100 km ocorreram

98% (Tabela 4.4), enquanto que até 25 km de distância dos focos da véspera ocorreram 44% dos focos atuais, até 50 km ocorreram 66% e até 100 km ocorreram 84% (Tabela 4.5).

Em relação à malha viária, a porcentagem acumulada das áreas das classes de distância (Tabela 4.2) foi numericamente similar à porcentagem acumulada da incidência de focos atuais nas mesmas classes (Tabela 4.4). Isso é ressaltado na Figura 4.11, pela coincidência das curvas relativas à malha viária. Por outro lado, para os focos da véspera, a porcentagem acumulada das áreas das classes (Tabela 4.3) não acompanhou o crescimento da porcentagem acumulada da incidência dos focos atuais nas classes (Tabela 4.5). Isso é observado na Figura 4.11, pela diferença nas curvas relativas aos focos da véspera que coincidem somente no final.

Conforme anteriormente considerado, tomando uma mesma distância em relação a ambos indicadores de atividade antrópica, a porcentagem acumulada de focos atuais foi maior para a malha viária do que para os focos da véspera, exceto até 10 km em que a incidência é similar (Tabelas 4.4 e 4.5). Entretanto, a área acumulada das classes de distância em relação à malha viária foi muito superior à área das mesmas classes de distância relativas aos focos da véspera (Tabelas 4.2 e 4.3). Os dados mostram que 24% dos focos atuais ocorreram até uma distância de 10 km da malha viária, que totalizam uma área de 582 mil km², correspondente a 27% da área total do Cerrado. Da mesma forma, 24% dos focos atuais ocorreram até uma distância de 10 km dos focos da véspera, com a área ocupada de 33 mil km², correspondente a 2% da área total do Cerrado. Aumentando a distância, 61% dos focos atuais ocorreram até uma distância de 30 km da malha viária, em uma área de 1.321 mil km², correspondente a 62% da área total do Cerrado, enquanto que 49% dos focos atuais ocorreram até 30 km dos focos da véspera, porém, com uma área ocupada de 211 mil km², correspondente a 10% da área do Cerrado.

Tabela 4.4 – Incidência dos focos de queimadas atuais para as classes de distância da malha viária, no período de maio a outubro/1998.

Classe de distância da malha viária (km)	Incidência de focos de queimadas atuais			
	Número	Porcentagem (%)	Número acumulado	Porcentagem acumulada (%)
0 - 5	1558	14%	1558	14%
5 - 10	1162	10%	2720	24%
10 - 15	1163	11%	3883	35%
15 - 20	1029	9%	4912	44%
20 - 25	1030	9%	5942	53%
25 - 30	879	8%	6821	61%
30 - 35	781	7%	7602	68%
35 - 40	530	5%	8132	73%
40 - 45	491	4%	8623	77%
45 - 50	386	3%	9009	80%
50 - 60	693	6%	9702	86%
60 - 70	600	5%	10302	91%
70 - 80	393	4%	10695	95%
80 - 90	230	2%	10925	97%
90 - 100	67	1%	10992	98%
100 - 150	236	2%	11228	100%
150 - 200	7	0%	11236	100%

Tabela 4.5 – Incidência dos focos de queimadas atuais para as classes de distância dos focos de queimadas da véspera, no período de maio a outubro/1998.

Classe de distância dos focos da véspera (km)	Incidência de focos de queimadas atuais			
	Número	Porcentagem (%)	Número acumulado	Porcentagem acumulada (%)
0 - 5	1376	12%	1376	12%
5 - 10	1308	12%	2684	24%
10 - 15	882	8%	3566	32%
15 - 20	691	6%	4257	38%
20 - 25	680	6%	4937	44%
25 - 30	514	5%	5451	49%
30 - 35	632	5%	6083	54%
35 - 40	544	5%	6627	59%
40 - 45	402	4%	7029	63%
45 - 50	329	3%	7358	66%
50 - 60	718	6%	8076	72%
60 - 70	458	4%	8534	76%
70 - 80	350	3%	8884	79%
80 - 90	291	3%	9175	82%
90 - 100	229	2%	9404	84%
100 - 150	722	6%	10126	90%
150 - 200	358	3%	10484	93%
200 - 250	265	3%	10749	96%
250 - 300	166	1%	10915	97%
300 - 350	127	1%	11042	98%
350 - 400	65	1%	11107	99%
450 - 450	47	0%	11154	99%
450 - 500	29	0%	11183	99%
500 - 1.000	53	1%	11236	100%
1.000 - 3.000	0	0%	11236	100%

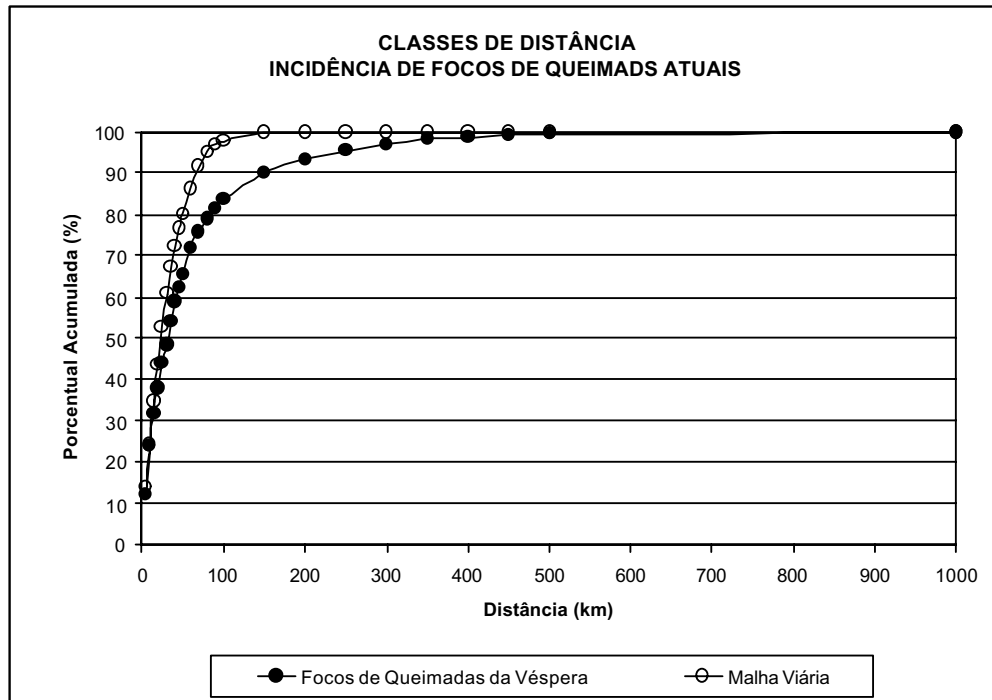


Figura 4.10 – Número percentual acumulado de focos de queimadas atuais por distância da malha viária e por distância dos focos de queimadas da véspera, no período de maio a outubro/1998.

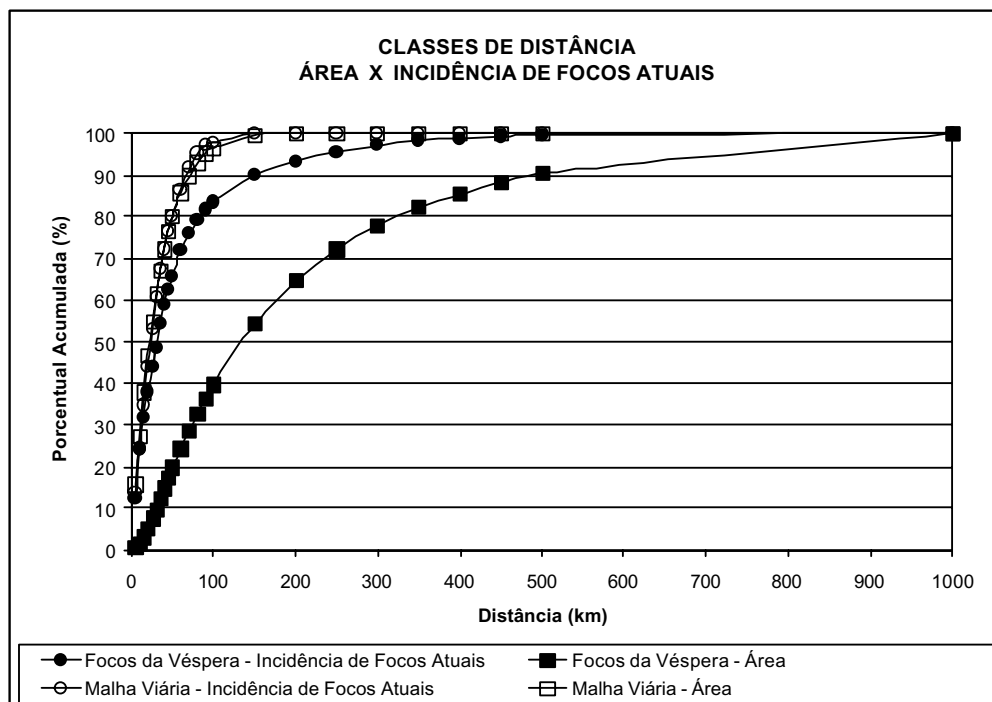


Figura 4.11 – Porcentagem acumulada da incidência dos focos de queimadas atuais e área por classe de distância da malha viária e por classe de distância dos focos de queimadas da véspera, no período de maio a outubro/1998.

Na perspectiva da prevenção de queimadas, seria vantajoso utilizar o parâmetro distância dos focos da véspera, pois a incidência de focos atuais até 5 e 10 km de distância de ambos indicadores antrópicos foi similar, cerca de 12% e 24%, respectivamente. Entretanto, a área ocupada por essas classes de distância foi muito menor para os focos da véspera, cerca de 0,5% e 1,6%, respectivamente, do que em relação à malha viária, cerca de 15,7% e 27,1%, respectivamente. Portanto, o parâmetro distância dos focos da véspera delimita uma menor área, possibilitando menor deslocamento de pessoal e equipamentos para prevenção e combate ao fogo.

Os focos de queimadas mudam de localização de um dia para outro, enquanto a malha viária é fixa. Ao priorizar aos focos da véspera para avaliação de áreas susceptíveis ao fogo, um sistema de prevenção deve ser dinâmico o suficiente para permitir o deslocamento e intervenção em locais diferentes do dia anterior, em um período de tempo inferior a 24 horas. Uma possível alternativa a ser testada seria a utilização da distância dos focos de queimadas anteriormente ocorridos, mas com um maior intervalo de tempo entre a data dos focos escolhidos e a data de atuação, permitindo mais tempo para deslocamentos e mobilização dos recursos para prevenção de queimadas.

4.5 - Conclusões

Os resultados mostram que a incidência dos focos atuais foi maior em áreas próximas da malha viária e de focos da véspera, com cerca de um quarto dos focos atuais ocorridos até 10 km de distância dos indicadores de atividade antrópica. Portanto, as áreas próximas a esses indicadores são mais susceptíveis à ocorrência de queimadas.

Considerando uma mesma distância em relação a ambos parâmetros de atividade antrópica, até 10 km a incidência de focos atuais foi similar: 24%. Dessa distância em diante, a maior incidência de focos atuais ocorreu mais próximo à malha viária do que dos focos da véspera. Foi observado que 53% dos focos atuais ocorreram até 25 km de distância da malha viária, 80% ocorreram até 50 km e 98% ocorreram até 100 km, enquanto que 44% dos focos atuais ocorreram até 25 km de distância dos focos da véspera, 66% ocorreram até 50 km e 84% ocorreram até 100 km.

Por outro lado, a área ocupada pelas classes de distância com incidência de focos atuais em relação à malha viária foi muito superior à área das mesmas classes de distância em relação aos focos da véspera. Foi observado que 24% dos focos atuais ocorreram até uma distância de 10 km da malha viária, em uma área correspondente a 27% da área total do Cerrado, enquanto que 24% dos focos atuais também ocorreram até uma distância de 10 km

dos focos da véspera, mas em uma área correspondente a 2% da área do Cerrado. Na perspectiva de prevenção de queimadas seria vantajoso utilizar o parâmetro distância dos focos da véspera, pois além de estar próximo de focos que irão ocorrer, ele abrange menor área possibilitando menor deslocamento de pessoal e equipamentos para prevenção do fogo.

Para estudos futuros sugere-se o uso de outros indicadores de atividades antrópicas como: centros urbanos; áreas de cultura anuais; áreas de pastagem natural e implantada; histórico de áreas previamente queimadas. Quanto aos focos de queimadas previamente ocorridos, detectados por sensores orbitais, além daqueles ocorridos no dia anterior, estudados neste trabalho, outras abordagens devem ser testadas: focos de queimadas ocorridos em intervalos de tempo dentro do período de estiagem corrente; focos acumulados do ano anterior ou de vários anos. Quanto à malha viária, é recomendável realizar uma avaliação com dados mais detalhados que contenham estradas secundárias e vicinais.

Os indicadores antrópicos, incluindo os utilizados neste trabalho, devem ser analisados em conjunto para verificar se existe vantagem em relação à sua utilização individualmente.

Referências

- ALHO, C.J.R.; MARTINS, E.S. 1995. **De grão em grão, o Cerrado perde espaço - Cerrado: impactos do processo de ocupação**. Brasília: Fundo Mundial para a Natureza (WWF).
- ANDERSON, A.B.; POSEY, D.A. 1985. Manejo de cerrado pelos índios Kayapó. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. 2(1):77-98.
- ASSAD, E.D.; EVANGELISTA, B.A. 1994. Análise freqüencial da precipitação pluviométrica. In: **Chuva no Cerrado: análise e espacialização**, Ed. E.D. Assad. Brasília: EMBRAPA-CPAC. p. 25-42.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J.; II, F.M. 1996. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. **Computers & Graphics**. 20(3):395-403.
- CASTRO, L.H.R.; MOREIRA, A.M.; ASSAD, E.D. 1994. Definição e regionalização dos padrões pluviométricos dos Cerrados brasileiros. In: **Chuva no Cerrado: análise e espacialização**, Ed. E.D. Assad. Brasília: EMBRAPA-CPAC. p. 13-23.
- CHUVIECO, E.; SALAS, F.J.; VEGA, C. 1997. Remote sensing and GIS for long-term fire risk mapping. In: **A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires**. Ed. E. Chuvieco. Alcalá de Henares, Spain: Universidad de Alacá. p. 91-108.

- CONSERVATION INTERNATIONAL [CI]. 2002. **Hotspots**. Disponível em: <<http://www.conservation.org.br/hotspots/index.htm>>. Acesso em agosto/2002.
- COUTINHO, L.M. 1990. Fire in the ecology of the Brazilian cerrado. In: **Fire in the tropical biota**. Ed. J.G. Goldammer. New York: Springer-Verlag. p. 82-105.
- COUTINHO, L.M. 2000. **Cerrado**. Disponível em: <<http://eco.ib.usp.br/cerrado>>. Acesso em agosto/2002.
- CRUTZEN, P.J.; ANDREAE, M. O. 1990. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**. 250:1669-1678.
- DIAS, B.F.S. 1996. Cerrados: uma caracterização. In: **Alternativas de desenvolvimento dos cerrados: manejo e conservação dos recursos naturais renováveis**. Ed. B.F.S DIAS. Brasília: Fundação Pró-Natureza (FUNATURA). p. 11-25.
- DIVISÃO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS / INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (DPI/INPE). 2002. **SPRING**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring>>. Acesso em maio/2002.
- FERRAZ, S.F.B.; VETTORAZZI, C.A. 1998. Mapeamento de risco de incêndios florestais por meio de sistema de informações geográficas (SIG). **Scientia Forestalis**. 53:39-48.
- FRANÇA, H. 2000. **Metodologia de identificação e quantificação de áreas queimadas no Cerrado com imagens AVHRR/NOAA**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 1993. **Mapa de Vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE. Escala 1:5.000.000.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 1997. **Mapa da série Brasil geográfico**. Rio de Janeiro: IBGE. CD-ROM.
- MANTOVANI, J.E.; PEREIRA, A. 1998. Estimativa da integridade da cobertura vegetal do Cerrado através de dados TM/Landsat. **Anais**. 9^o Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, 11-18/setembro/1998. INPE/SELPER. CD-ROM.
- MISTRY, J. 1998a. Fire in the cerrado (savannas) of Brazil: an ecological review. **Progress in Physical Geography**. 22(4):425-448.
- MISTRY, J. 1998b. Decision-making for fire use among farmers in savannas: an exploratory study in the Distrito Federal, central Brazil. **Journal of environmental Management**. 54:321-334.
- MOREIRA, A. 1996. Proteção contra o fogo e seu efeito na distribuição e composição de espécies de cinco fisionomias de cerrado. In: **Impactos de queimadas em áreas de**

- cerrado e restinga**. Ed. H.S.Miranda, C.H.Saito, B.F.S.Dias, Brasília: Departamento de Ecologia / Universidade de Brasília (ECL/UnB). p 112-121.
- MUELLER-DUMBOIS, D.; GOLDAMMER, J.G. 1990. Fire in the tropical ecosystems and global environmental change: an introduction. In: **Fire in the tropical biota**, Ed. J.G. Goldammer. New York: Springer-Verlag. p. 1-10.
- NIMER, E.; BRANDÃO, A.M.P.M. 1989. **Balço hídrico e clima da Região dos Cerrados**. Rio de Janeiro: IBGE.
- OLIVEIRA, P.E. 1998. Fenologia e biologia reprodutiva das espécies de Cerrado. In: **Cerrado: Ambiente e Flora**, Ed. S.M. Sano e S.P. Almeida. Planaltina: EMBRAPA/CPAC. p. 169-192.
- PEREIRA JR., A. C. 1992. **Monitoramento de queimadas na região dos Cerrados com utilização de dados AVHRR/NOAA corrigidos com dados TM/Landsat**. Dissertação (Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos. (INPE-5490-TDI/507).
- PEREIRA, J.A.R.; SETZER, A. 2001. Brazilian Validation of AVHRR fire pixels. In: **Global and regional vegetation fire monitoring from space: planning a coordinated international effort**, Ed. F. Ahern, J.G. Goldammer, C. Justice. Netherlands: Academic Publishing.
- PEREIRA, M.C. 1987. **Detecção, monitoramento e análise de alguns efeitos ambientais de queimadas na Amazônia através da utilização de imagens dos satélites NOAA e Landsat, e dados de aeronave**. Dissertação (Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos. (INPE-4503-TDL/326).
- PEREIRA, M.C., SETZER, A.W. 1993. Spectral characteristics of deforestation fires in NOAA/AVHRR images. **International Journal of Remote Sensing**. 14(3):583-597.
- PIVELLO, V.R.; NORTON, G.A. 1996. FIRETOOL: an expert system for the use of prescribed fire in Brazilian savannas, **Journal of Applied Ecology**. 33:348-356.
- RAMOS NETO, M.B. 2000. **O Parque Nacional de Emas (GO) e o fogo: implicações para a conservação biológica**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.
- RIBEIRO, J.F.; WALTER, B.M.T. 1998. Fitofisionomias do Cerrado. In: **Cerrado: Ambiente e Flora**, Ed. S.M. Sano e S.P. Almeida. Planaltina: EMBRAPA/CPAC. p. 89-166.
- SOARES, R.V. 1985. **Incêndios florestais - controle e uso do fogo**. Curitiba: FUPEF.

5 - CONCLUSÕES

Três condições simultâneas são necessárias para ocorrência de queimadas em vegetação do Cerrado: condições meteorológicas propícias; disponibilidade de combustível vegetal; existência de fonte de ignição. Este trabalho estudou a susceptibilidade da vegetação do Cerrado ao fogo em relação a essas condições.

As condições meteorológicas que ocorreram em 95% das células de 50 x 50 km com queimadas no Cerrado no período de maio a outubro/1998 foram: a) precipitação inferior a 2 mm; b) precipitação acumulada em 5 dias inferior a 25 mm; c) umidade relativa do ar inferior a 60%; d) temperatura do ar superior a 28°C; e) mais de um dia sem chuva antecedendo a queimada. Estudos semelhantes deverão ser realizados em outros anos para verificar se esses valores podem ser generalizados para qualquer período.

Os resultados mostram que tanto os locais com focos de queimadas quanto os sem focos apresentaram as condições meteorológicas mínimas propícias à combustão da vegetação similar aos relatados na literatura. Portanto, 64 a 94% do Cerrado estavam susceptíveis à ocorrência de fogo, considerando apenas o fator meteorológico. Estudos específicos deverão ser realizados para determinar as condições meteorológicas mínimas propícias à queima do combustível vegetal no Cerrado e verificar se as mesmas estão de acordo com as relatadas na literatura. Essa informação poderá ser obtida com o método aqui utilizado para determinar as condições meteorológicas em que ocorreram as queimadas, ampliando o período de estudo ao longo do um ano. As condições meteorológicas mínimas para ocorrência de queimadas no Cerrado seriam encontradas nos períodos de transição da estação chuvosa para a estação seca e da estação seca para a chuvosa. Esses parâmetros poderão ser determinados com mais precisão em experimentos de laboratório com as condições meteorológicas controladas.

Apesar da existência de condições meteorológicas mínimas para ocorrência de queimadas em quase todo Cerrado, a maioria dos focos ocorreu preferencialmente em regiões nas quais elas foram mais extremas, ou seja, menor precipitação e umidade relativa do ar e maior temperatura do ar, quando comparado com as condições das regiões sem incidência de focos de incêndio. Possivelmente, essa diferença resultou da ação humana de escolher dias com condições meteorológicas propícias para obtenção de maior eficiência e melhor propagação do fogo que, dessa forma, atingiria áreas extensas e eliminaria quase toda vegetação seca. Trabalhos deverão ser realizados para caracterizar as condições meteorológicas extremas em que o fogo é utilizado nas práticas agropecuárias no Cerrado.

Foi proposto um método para estimar a susceptibilidade da vegetação do Cerrado ao fogo utilizando mosaicos do IVDN e do canal 3 ($3,7\mu\text{m}$) gerados de imagens AVHRR/NOAA-14. O método foi avaliado pela sobreposição dos mapas de susceptibilidade com os dados de localização de focos de queimadas detectados em imagens AVHRR/NOAA-12. Os resultados indicaram a possibilidade de determinar sete classes de cobertura vegetal. Para cada classe foi atribuído um grau de susceptibilidade ao fogo, variando entre muito baixo, baixo, médio e alto. As classes com susceptibilidade ‘média’ e ‘alta’ foram bem delimitadas e foi possível identificar as áreas com maior disponibilidade de combustível vegetal seco, onde ocorreram 72% dos focos de queimadas, indicando resultados satisfatórios no desenvolvimento preliminar do método. As áreas dessas classes, ao longo do período de estudo, mostraram que entre 45 e 83% da vegetação do Cerrado estavam susceptíveis ao fogo.

Dados de novos sensores devem ser testados para delimitar classes de susceptibilidade ao fogo no Cerrado, especialmente do ‘Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer’ (MODIS), a bordo das plataformas Terra e Aqua, pois o mesmo tem resolução temporal adequada, de 1 a 3 dias, melhor resolução espectral, pois possui 36 canais e melhor resolução espacial, com 250m, 500m e 1km, quando comparado com o AVHRR/NOAA.

Os resultados mostraram que a incidência dos focos de queimadas foi maior em áreas próximas da malha viária e de focos do dia anterior, com cerca de um quarto dos focos ocorrendo até 10 km de distância destes dois indicadores de atividade antrópica. Portanto, as áreas de vegetação próximas a esses indicadores são mais susceptíveis ao fogo. Dessa distância em diante, a incidência de focos de queimadas foi maior em relação à malha viária do que para focos do dia anterior: cerca de 53% dos focos ocorreram até 25 km da malha viária e até 35 km dos focos do dia anterior; e cerca de 95% ocorreram até 80 km da malha viária e até 250 km dos focos do dia anterior. Por outro lado, as áreas ocupadas pelas classes de distância em relação à malha viária foram superiores às áreas das mesmas classes de distância em relação aos focos do dia anterior. Foi observado que 24% dos focos atuais ocorreram até uma distância de 10 km da malha viária, em uma área correspondente a 27% do Cerrado, enquanto que 24% dos focos atuais também ocorreram até uma distância de 10 km dos focos do dia anterior, mas em uma área correspondente a 2% do Cerrado. Na perspectiva de prevenção de queimadas, seria vantajoso utilizar o parâmetro distância dos focos do dia anterior, pois além de eles estarem próximos de focos que irão ocorrer, eles abrangem menor área resultando em menor deslocamento de pessoal e equipamento para prevenção e combate ao fogo.

O aumento da densidade da malha viária obtido com a inclusão de estradas secundárias e vicinais deve ser analisados quanto aos efeitos nos resultados desse indicador. Quanto aos focos de queimadas prévios, além daqueles ocorridos no dia anterior, estudados neste trabalho, outros períodos poderiam ser testados, como: conjunto de focos ocorridos em outros intervalos de tempo dentro do período de estiagem corrente; focos acumulados do ano anterior ou de vários anos; etc. Ainda em relação às queimadas, em vez dos focos, poderiam ser analisadas as áreas queimadas. Um passo nesse sentido foi dado no trabalho apresentado no Capítulo 3, no qual as regiões com ocorrência de queimadas na quinzena constituem uma das classes de cobertura vegetal. Da mesma forma, essa abordagem de proximidade de indicadores antrópicos poderia ser utilizada em relação às áreas de culturas anuais delimitadas também no trabalho do Capítulo 3. Caso fosse possível delimitar as áreas de pastagens, elas deveriam ser estudadas da mesma forma.

Além dos indicadores antrópicos citados, poderiam ser avaliados também fatores socioeconômicos como tamanho de propriedade, concentração de terra, renda e crédito rural, etc. Não devem ser desprezados os aspectos idiossincráticos, culturais e mesmo religiosos envolvidos na prática de queimadas. Aspectos do clima, ciclo lunar, estado e qualidade da vegetação podem ser considerados pelos fazendeiros para decidirem quanto atear fogo na vegetação. Também datas de feriados nacionais e religiosos podem ser consideradas na decisão, assim como datas peculiares para um dado fazendeiro, como um dia do ano, uma semana, um mês, etc.

Os indicadores antrópicos devem ser analisados em conjunto para verificar se existe vantagem em relação à sua utilização individual.

Os resultados dos trabalhos aqui apresentados, embora preliminares, mostram que no período de maio a outubro/1998 cerca de 64 a 94% da área do Cerrado estava sob condições meteorológicas propícias à queima e havia disponibilidade de combustível vegetal em cerca de 45% a 83% de sua área. A proximidade de atividades antrópicas foi um bom indicador de susceptibilidade da vegetação do Cerrado ao fogo, permitindo delimitar áreas menores incluindo a maioria dos focos de queimadas. Esses resultados indicam a necessidade de inclusão de indicadores de atividades antrópicas em índices de risco de fogo para o Cerrado, pois normalmente não são utilizados ou quando o são, estão associados a fatores de menor peso.