

Análise dos impactos das mudanças climáticas sobre o risco de incêndios florestais no estado do Paraná

Analysis of climate change on Paraná state forest fire risk

Antonio Carlos Batista¹, Alexandre França Tetto¹, Flavio Deppe²,
Leocádio Grodzki³ e Jean Thiago Grassi⁴

Resumo

Os incêndios florestais são um fenômeno global resultante da interação entre o clima, os combustíveis e as atividades humanas. Há uma expectativa da maioria dos pesquisadores de que as mudanças no clima nos próximos 100 anos acarretará um impacto muito importante nos ecossistemas florestais. O objetivo desse trabalho foi determinar, por decênio, o zoneamento de risco de incêndios florestais para o estado do Paraná, considerando os cenários previstos pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) em 2007. Para isso foram utilizados dados sobre cobertura vegetal, umidade do material combustível, índice de perigo de incêndios (FMA), declividade, hipsometria, orientação das encostas, densidade demográfica e sistema viário. Essas informações, após serem classificadas em função do risco de incêndios, foram ponderadas em um modelo matemático. Os valores determinados compuseram o Zoneamento de Risco de Incêndios Florestais (ZRIF), por decênio, para o estado. Foi observado que para o melhor cenário, que considera um aumento de 1,8 °C na temperatura média da Terra até 2100, haverá um aumento na classe de risco extremo de incêndios florestais, passando de 1,80% da área do estado em 2020 para 8,49% em 2100. O mesmo ocorre com a classe de risco muito alto, que passa de 10,43% (2020) para 32,38% (2100). Para o pior cenário, que considera um acréscimo de 4,0 °C na temperatura média da Terra até 2100, a classe de risco extremo passa de 2,18% (2020) para 22,72% (2100), enquanto a classe de risco muito alto passa de 13,93% (2020) para 55,95% (2100). Caso se confirmem as previsões do IPCC, haverá um aumento no número de ocorrências e áreas atingidas pelos incêndios florestais no estado do Paraná, o que exigirá ações integradas de prevenção e combate para minimizar possíveis danos ambientais, sociais e econômicos.

Palavras-chave: oscilações climáticas, material combustível, Fórmula de Monte Alegre, umidade do material combustível, zoneamento de risco de incêndio florestal.

Abstract

Forest fires are global phenomena resulting from the interaction between climate, fuels and human activities. There is an expectation of most researchers that changes in climate over the next 100 years will cause a major impact on forest ecosystems. The aim of this study was to determine, by decade, the zoning of forest fire risk for the state of Paraná, based on the scenarios predicted by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in 2007. For this maps of vegetation were used, fuel moisture, Monte Alegre Formula (FMA), slope, altimetry, slope orientation, population density and road systems. This information, after being classified according to the risk of fire hazard, were weighted in a mathematical model. The determined values were then used to compose the Forest Fires Zoning Risk (ZRIF) per decade for the State. It was observed that for the best scenario, which considers an increase of 1.8 °C in the average temperature of the Earth by year 2100, there will be an increase in class extreme risk of forest fires, rising from 1.80% of the area of the State in 2020 to 8.49% in 2100. The same applies to the class of very high risk, which rises from 10.43% (2020) to 32.38% (2100). For the worst scenario, which considers an increase of 4.0 °C in the average temperature of the Earth by 2100, the class of extreme risk rises from 2.18% (2020) to 22.72% (2100). The higher risk class rises from 13.93% (2020) to 55.95% (2100). If the IPCC predictions were confirmed, there will be an increase in the number of occurrences and areas affected by forest fires in the state of Paraná, which will require integrated actions to prevent and suppress forest fires to minimize environmental damage, social and economic.

Keywords: climate oscillations, forest fuel, Monte Alegre Formula, fuel moisture, forest fire zoning of risk.

¹Engenheiro Florestal. Professor Doutor do Departamento de Ciências Florestais. UFPR – Universidade Federal do Paraná. Rua Lothário Meissner, 632 – Jardim Botânico – 80.210-170 – Curitiba, PR – E-mail: batistaufpr@ufpr.br; tetto@ufpr.br

²Engenheiro Florestal. Pesquisador Doutor do Simepar. Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná – 81.531-980 - Curitiba, PR – E-mail: deppe@simepar.br

³Agrônomo, Doutor. Pesquisador aposentado do Iapar – Instituto Agromômico do Paraná. E-mail: lgrodzki@hotmail.com

⁴Engenheiro Cartógrafo, Pesquisador do Simepar. Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná – CEP 81.531-980 - Curitiba, PR – Brasil – E-mail: jgrassi@simepar.br

INTRODUÇÃO

A ação do fogo sobre a floresta atinge não só a cobertura vegetal, mas também as características do solo, a fauna e a atmosfera, podendo ser altamente destrutiva quando se trata de incêndios florestais. Um incêndio ocorre na presença simultânea do oxigênio, material combustível e fonte de calor (MARQUES et al., 2011). De acordo com a terminologia de incêndios florestais proposta pela *Food and Agriculture Organization* (FAO), “risco de incêndio” é definido como a probabilidade de um incêndio iniciar devido à presença e atividade de agentes causais ativos. Já o termo “perigo de incêndio” é utilizado para expressar o grau de envolvimento dos fatores fixos e variáveis que determinam a facilidade de ignição, taxa de propagação, dificuldade de controle e impacto dos incêndios, geralmente expresso como um índice (FAO, 2007).

A avaliação do risco de incêndios florestais é uma parte crítica na prevenção de incêndios, já que para o planejamento da pré-supressão e combate aos incêndios são necessárias ferramentas para monitorar quando e onde um incêndio pode ocorrer ou quando os seus efeitos serão mais negativos (CHUVIECO et al., 2010).

Diversos fatores podem explicar a ignição e a propagação dos incêndios florestais, tais como: as características dos combustíveis, condições meteorológicas, fontes de ignição e topografia. As características dos combustíveis dependem da estrutura e composição da vegetação, aliadas aos fatores antropogênicos (MARQUES et al., 2011). Outro fator importante de ignição é a influência das atividades humanas, que aumentam o risco de incêndios nas vizinhanças das redes de estradas e áreas urbanas (CARDILLE et al., 2001).

O risco de incêndios tem sido avaliado por meio de fatores fixos e variáveis do ambiente de fogo (por exemplo: combustíveis, condições meteorológicas e topografia) que determinam a facilidade de ignição, a taxa de propagação, a dificuldade de controle e o impacto dos incêndios florestais (VADREVU et al., 2010).

A importância de se elaborar mapas de risco de incêndios florestais tem sido evidenciada há muito tempo (SHOW; CLARKE, 1953). Uma forma muito simples de se obter um mapa de risco de incêndios florestais é por meio da utilização de relatórios de incêndios de anos anteriores, plotando em um mapa as áreas atingidas pelos incêndios. Quando se tem registros de vários anos, pode-se definir um padrão para as

áreas de maior ocorrência e traçar limites que as definam como áreas especiais de risco (BROWN; DAVIS, 1973; CHANDLER et al., 1983).

Vários pesquisadores têm desenvolvido zoneamento de risco de incêndios florestais, utilizando métodos que permitem associar os fatores ambientais de uma região com os incêndios florestais, possibilitando desta forma mapear o risco potencial de incêndios dessa área em função da sensibilidade dos fatores analisados em relação ao fogo. Os principais fatores utilizados nesses estudos, para estabelecer os níveis de risco de incêndios florestais, são: tipo de cobertura vegetal, características do material combustível, variáveis meteorológicas (temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e sentido dos ventos e precipitação), topografia e atividades humanas geradoras de ignição (estradas, demografia e tipo de uso e ocupação da terra) (SALAS; CHUVIECO, 1994; FERRAZ; VETTORAZZI, 1998; VERDE, 2008; CHUVIECO et al., 2010; MARQUES et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2012).

As mudanças climáticas podem afetar o número de incêndios ocorridos anualmente, a duração da estação de incêndios, a área queimada por incêndios e pode aumentar a intensidade do fogo. As alterações nestas propriedades do fogo significam incêndios sazonais mais frequentes e com maior intensidade e, portanto maior potencial de incêndio (IPCC, 2007).

Vários estudos têm demonstrado o impacto das mudanças climáticas no comportamento dos incêndios florestais em várias partes do mundo, como por exemplo as pesquisas de Liu et al. (2012) sobre os padrões espaciais de ocorrência de incêndios e sua tendência futura no nordeste da China; de Liu et al. (2010) sobre tendências globais do potencial de incêndios florestais em função das mudanças climáticas; e as pesquisas realizadas por Westerling e Bryant (2008) sobre as mudanças climáticas e incêndios florestais na Califórnia.

Flannigan et al. (2009a) revisaram o entendimento atual do que o futuro pode trazer com respeito aos incêndios florestais. Pesquisas realizadas na China por Tian et al. (2011) sugerem um aumento geral nas áreas queimadas e nas ocorrências dos incêndios, mas com uma variação espacial considerável, com algumas áreas sem alteração ou mesmo com decréscimo nas áreas queimadas e no número de ocorrências de incêndios.

Estudos recentes realizados por Flannigan et al. (2009b) sugerem uma duplicação das áreas queimadas e um aumento de 50% das ocorrên-

cias em várias partes das florestas boreais até o final deste século. As estações de incêndios estão se alongando nas regiões temperadas e boreais e essa tendência deve continuar nas regiões mais quentes do mundo.

O Paraná é um estado com longa tradição no uso e manejo dos recursos florestais, principalmente devido à exploração das extensas áreas de floresta com araucária que cobriam quase todo território paranaense em meados do século 20 (MAACK, 2012). É também o estado em que ocorreu um dos maiores incêndios florestais do mundo, que em 1963 queimou uma área de 2 milhões de hectares, sendo 20.000 hectares de plantações, 500.000 hectares de florestas primárias e 1.480.000 hectares de campos, florestas secundárias e capoeiras (SOARES; BATISTA, 2007). E desde essa época o Paraná tem sido pioneiro em pesquisas sobre controle de incêndios florestais no Brasil (SOARES et al., 2009).

Tendo em vista a importância do zoneamento de risco de incêndios florestais e considerando-se a hipótese de que a frequência e a intensidade dos incêndios florestais irão aumentar em função do aquecimento global, o objetivo desse trabalho foi avaliar o risco de incêndios florestais para o estado do Paraná, considerando os cenários previstos pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) em 2007.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo compreende todo o território do estado do Paraná, situado entre os paralelos de 22° 30' 58" de latitude norte e 26° 43' 00" de latitude sul e os meridianos 48° 05' 37" e 54° 37' 08" a oeste de Greenwich. O território paranaense compreende uma área de 199.281,7 km², que corresponde a 2,34% da área do Brasil e 34,61% da área da região sul. Em 2010, o estado contava com 399 municípios, 10.444.526 habitantes e uma densidade demográfica média de 52,40 hab/km², sendo que grande parte desta população se encontra na área urbana (85,3%). No Paraná as altitudes variam desde o nível do mar até 1.922,0 m no Pico do Paraná, localizado na Serra do Mar, ponto mais elevado do estado e também da região sul (IBGE, 2000, 2010).

A posição geográfica e sua topografia fazem com que o estado possua dois tipos dominantes de clima, tendo um terceiro abrangendo pequena área territorial entre a faixa litorânea e o Vale do Ribeira (IAPAR, 1994). Segundo a classificação de Köppen (TREWARTHA; HORN, 1980), baseada na temperatura e pluviosidade, o Paraná possui as seguintes tipos climáticos: Cfa, Cfb e Af.

O trimestre menos chuvoso ou mais seco (junho, julho e agosto) mostra que as regiões

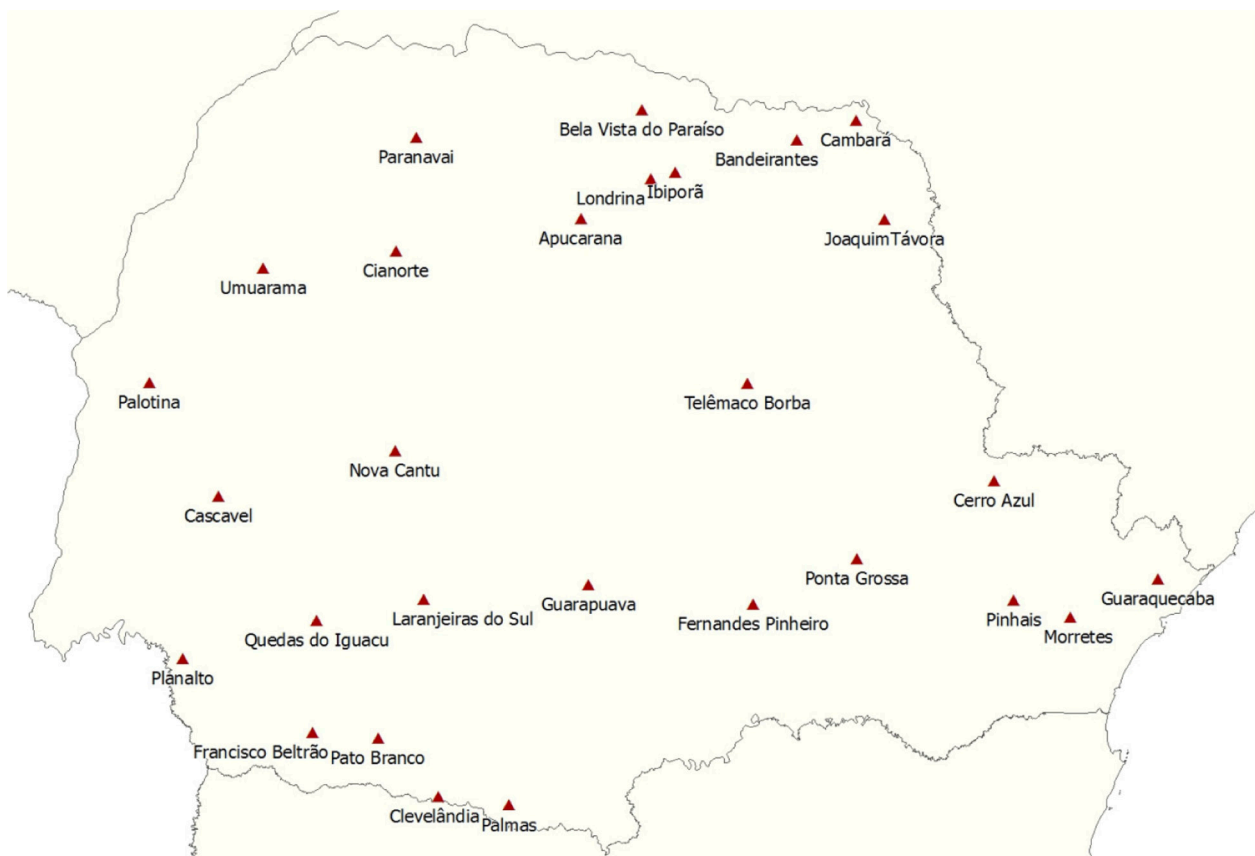


Figura 1. Localização das estações meteorológicas do IAPAR.
Figure 1. Weather station locations.

sudeste e sul são as que têm maior precipitação (entre 350 e 450 mm) seguidas de parte da região sul, centro e oeste (250 a 350 mm), reduzindo-se na região norte, à medida que se aproxima da margem do rio Paranapanema, divisa com o estado de São Paulo (150 a 250 mm). A combinação de baixas temperaturas com ocorrência de geadas (GRODZKI et al., 1996) e a diminuição da precipitação fazem desse trimestre o mais propício à seca, tornando-se suscetível aos incêndios florestais.

Obtenção e análise dos dados

Para obtenção das informações necessárias à realização da pesquisa, foram utilizados os seguintes dados e documentos cartográficos:

- Temperatura, umidade relativa e precipitação (série histórica) das 28 estações meteorológicas do IAPAR de um período de 40 anos (1970 - 2010) (Figura 1);
- Altitude, declividade e orientação de encostas (INPE, 2008);
- Densidade demográfica (IBGE, 2010);
- Mapa com o limite estadual e a malha municipal do estado do Paraná, em escala de 1:250.000 (IBGE, 2007);
- Mapa da cobertura vegetal do Paraná (BRASIL, 2005);
- Mapa do sistema viário do Paraná (DER, 2010).

O método consistiu na elaboração de mapas de risco preliminares para cada variável em estudo: cobertura vegetal, umidade do material combustível, índice de perigo de incêndios (FMA), declividade do terreno, hipsometria, orientação das encostas, densidade demográfica e sistema viário. Esses mapas foram integrados por meio de uma soma ponderada das características dos combustíveis, condições meteorológicas e fontes de ignição, conforme a equação:

$$RIF=0,33*((MC+UMC)/2)+0,33*((FMA+DE-Hipso+Orient)/4)+0,33*((DD+SV)/2)$$

Em que:

RIF = risco de incêndio florestal calculado em cada unidade de análise;

MC = material combustível;

UMC = umidade do material combustível;

FMA = índice de perigo de incêndios;

DE = declividade do terreno;

Hipso = altimetria;

Orient = orientação das encostas;

DD = densidade demográfica;

SV = distribuição do sistema viário.

O mapa de risco em função da cobertura vegetal (material combustível) foi elaborado com base no mapa de vegetação do PROBIO (2005). Essa variável foi considerada estática para o período analisado. As 55 coberturas vegetais encontradas no referido levantamento foram agrupadas nas seguintes classes: agricultura, campos/pastagem, cobertura florestal, cultivo florestal e sem informação.

A umidade do material combustível foi estimada pela equação proposta por Simard (1968):

$$E = 21,06 - 0,4944.H + 0,005565.H^2 - 0,00063.H.T (H > 50)$$

Em que:

E = umidade do material combustível, em porcentagem;

H = umidade relativa do ar, em porcentagem;

T = temperatura do ar, em ° C.

Para esta variável, considerada dinâmica para o período analisado, foram gerados dois cenários, de acordo com o relatório do IPCC de 2007: i) melhor cenário - aumento de 1,8 °C na temperatura média da Terra até 2100; e ii) pior cenário - acréscimo de 4,0 °C na temperatura média da Terra até 2100.

Os resultados foram classificados em 5 classes por meio do método do Quantil e, posteriormente, foi realizada a interpolação por meio do Método de Kriging.

Para a estimativa das variáveis meteorológicas necessárias foram realizadas simulações estocásticas, com o programa PGECLIMA_R (VIRGENS FILHO et al., 2011) para o período de 2010 a 2100.

O índice acumulativo de perigo de incêndios foi calculado para o período de 2010 a 2100 e para os dois cenários, utilizando a Fórmula de Monte Alegre (FMA). Após calculados os índices, os valores foram classificados em 5 classes por meio do Método do Quantil e interpolados pelo Método de Kriging.

A declividade, altimetria e orientação das encostas foram consideradas variáveis estáticas para o período analisado, tendo sido obtidas a partir do TOPODATA (INPE, 2008). As classificações foram feitas com base em Soares e Batista (2007), Salas e Chuvieco (1994) e Ferraz e Vettorazzi (1998), respectivamente.

Para se espacializar a variável densidade demográfica (variável dinâmica) foram utilizados dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) referentes aos censos de 1991,

2000 e 2010 para cada município do estado do Paraná, como também as estimativas populacionais de 2000 a 2009. Inicialmente foi necessário estimar a população a cada década para posterior cálculo da densidade. Para isso, foi utilizado o método de Von Sperling (2005), sendo utilizada a projeção populacional denominada taxa decrescente de crescimento. Os valores observados para a densidade demográfica por município foram distribuídos em cinco classes adaptadas de Guillermo Julio (1992).

Tendo em vista que a distância em relação ao sistema viário é inversamente proporcional ao risco de incêndio florestal, foram delimitados *buffers* de influência a partir dos eixos das estradas municipais, estaduais, federais e linhas férreas, adaptada de Salas e Chuvieco (1994). Essa variável foi considerada estática para o período analisado e as informações foram obtidas do DER (2010).

O mapa de risco final foi obtido da álgebra entre os mapas de risco preliminares (FERRAZ; VETTORAZZI, 1998; SALAS; CHUVIECO, 1994, SOUSA et al., 1996).

Os dados obtidos foram classificados em cinco classes de risco (baixo, moderado, alto, muito alto, extremo), utilizando o método Quantil. Em seguida, foram gerados mapas para o melhor e pior cenários.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapa de risco de incêndios florestais em função da cobertura vegetal apresentou uma área de 4.263.177,93 ha (21,53% da área do estado) na classe de risco extremo, enquanto a área referente à classe muito alto totalizou 6.187.629,95 ha (31,25%). Essas áreas se concentraram na região leste e noroeste do estado. Na região leste encontram-se os remanescentes florestais mais extensos do estado, enquanto na região noroeste predominam extensas áreas de pastagens. Essas áreas de maior risco refletem a maior inflamabilidade da vegetação quando comparadas com os outros tipos de vegetação encontrados no estado do Paraná.

Quanto à umidade do material combustível, no melhor cenário da simulação, não foram observadas classes com risco muito alto e extremo em 2020. Em 2100 essas classes já cobriam mais da metade do estado (56,08%), sendo que a classe extrema se concentrou na região norte, com 11,97% da área do estado. O pior cenário da simulação também não apresentou as clas-

ses mais extremas (muito alto e extremo) em 2020, quando comparado ao melhor cenário. No entanto, em 2100, grande parte do estado foi classificada na classe de risco extremo de incêndio florestal, totalizando 91,33%. O conteúdo de umidade é a mais importante propriedade que controla a inflamabilidade dos combustíveis vivos e mortos (SOARES; BATISTA, 2007) e, portanto, tem grande influência sobre o risco de incêndios (ADAB et al., 2013). A umidade do material combustível é o reflexo do clima e das condições atmosféricas. Os resultados mostraram que à medida que o clima vai se tornando mais seco ao longo dos anos, de acordo com o cenários do IPCC de 2007, mais extensas as áreas onde os combustíveis florestais estão mais secos e, portanto mais perigosos e mais inflamáveis.

Com relação à simulação para o melhor cenário do FMA, observou-se uma discreta variação espacial do comportamento do índice, com pouca variação em termos de área no estado. Em 2020 as classes alto, muito alto e extremo totalizaram 62,58% do estado, mantendo-se praticamente nesta extensão em 2100. Para o pior cenário, notou-se uma variação espacial significativa no período analisado, sendo que as classes muito alto e extremo ocuparam mais da metade do estado no final do período. Neste cenário, as classes alto, muito alto e extremo que totalizavam 56,82% do estado em 2020, alcançam 96,89% da área em 2100.

Em termos de declividade, o estado apresentou-se em grande parte nas classes de risco baixo e moderado. A classe de risco baixo totalizou 12.802.087,64 ha (64,41% da área do estado) e a classe moderado 3.845.465,64 ha (19,35% do estado). O risco extremo se concentrou na Serra do Mar e no Vale da Ribeira e correspondeu a 3,00% da área total. De acordo com Adab et al., 2013, a declividade é um dos parâmetros que influencia a taxa de propagação do fogo. O fogo se move mais rapidamente subindo as encostas e mais lentamente descendo. Além disso, a taxa de propagação do fogo pode aumentar nas encostas mais íngremes, devido as chamas ficarem inclinadas mais próximas da superfície do solo, e o processo de convecção de calor pode ser aumentado pelo vento, devido o comportamento do fogo.

O risco de incêndios em função da altimetria mostrou que grande parte do estado foi classificado nos graus de risco alto, muito alto e extremo, totalizando 98,23% da área (altitude menor que 1200 m s.n.m.). Conforme Hernandez-Leal

et al. (2006), a altitude é uma variável fisiográfica que está associada com a temperatura, a umidade e o vento. Portanto, ela tem um papel importante na propagação do incêndio. A altitude influencia a estrutura da vegetação, a umidade do ar e dos combustíveis. Foi observado que a umidade e a temperatura têm maior influência sobre o fogo em áreas com maior altitude. Também tem sido relatado que as tendências de comportamento do fogo são menos graves em locais mais elevados devido as maiores precipitações (CHUVIECO; CONGALTON, 1989).

As classes de risco de incêndios em função da orientação das encostas que mais se destacaram foram baixo, com 36,59% da área, seguida da muito alto, com 25,20% e alto, com 12,93%. A orientação das encostas está correlacionada com a quantidade de energia solar que uma área recebe (SOARES; BATISTA, 2007). As encostas voltadas para o norte recebem mais luz do sol e apresentam altas temperaturas, ventos fortes, baixa umidade e umidades baixas de combustível no hemisfério sul. Portanto, a vegetação é tipicamente mais seca e menos densa nas encostas norte do que as voltadas para o sul (SOARES; BATISTA, 2007; VADREU et al., 2010). Por causa disso, os combustíveis mais secos estão mais expostos à ignição (ADAB et al., 2013).

A simulação da densidade demográfica e sua classificação em termos de risco de incêndio florestal mostrou uma manutenção do maior risco nas regiões norte, leste e oeste do estado. O estado possuía, em 2010, 76,41% da sua área na classe de risco baixo, valor que apresentou queda no período analisado, passando para 69,70% da área. A classe de risco extremo passou de 7,83% para 12,72%, o que representou um crescimento de 62,4%. Os seres humanos são os causadores da grande maioria dos incêndios e, portanto a densidade demográfica é um fator que expressa o efeito onipresente da população sobre a ignição e propagação do fogo. Neste sentido, Marques et al. (2011), afirmam que a densidade populacional tem sido apontada como a principal fonte das ignições de incêndios em Portugal.

O sistema viário apresentou uma área de influência de 831.534,89 ha (4,38% da área do estado). Essa área está dividida em 170.692,29 ha no grau de risco baixo, 167.645,26 ha no grau de risco moderado, 166.028,33 ha no grau de

risco alto, 164.268,51 ha no grau de risco muito alto e 162.900,50 ha no grau de risco extremo. O sistema viário não apresentou influência em 95,62% da área do estado. Cabe destacar que as atividades humanas são um dos fatores básicos que afetam as ocorrências de incêndios (XU DONG et al., 2005). Devido às atividades humanas mais intensas, o risco de incêndio é maior e oferece muita oportunidade para a inesperada ignição provocada pelo homem (ALENCAR et al., 2004). Proximidade de estradas e densidade rodoviária são parâmetros potencialmente importantes uma vez que as estradas facilitam o acesso de pessoas em áreas de floresta e de pastagem e provocam início de incêndios (JAISWAL et al., 2005).

Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os zoneamentos de risco de incêndios florestais, nos anos 2020 e 2100, para o melhor cenário. No primeiro decênio (2020) o risco estava concentrado nas classes moderado e alto, com 33,04% e 54,64%, respectivamente. Áreas situadas na região norte do estado e no entorno da Região Metropolitana de Curitiba concentravam grande parte do risco extremo de incêndios florestais, que totalizaram 1,80% da área total. Este valor se ampliou no decênio seguinte, passando para 2,51%, o mesmo comportamento se observou para a classe muito alto, variando de 10,43% para 13,82%.

Este comportamento se manteve ao longo do período analisado. Em 2100, a área correspondente à classe de risco baixo foi de 0,01%, enquanto a classe moderado correspondeu a 7,66%, a classe alto a 51,47%, a classe muito alto a 32,38% e a classe extremo a 8,49%.

Nas Figuras 4 a 5 são apresentados os zoneamentos de risco de incêndios florestais, nos anos 2020 e 2100, para o pior cenário. No decênio de 2020, grande parte do estado se apresentou na classe de perigo alto (51,74% da área), seguido pelo moderado (32,08%) e muito alto (13,93%). A classe de perigo extremo, com 2,18% da área, passou nos decênios seguintes a 3,54% e 5,98%, respectivamente.

Em 2100 o estado não apresentou mais área na classe de risco baixo e a classe de risco moderado correspondeu a 0,07% do estado. A classe alto, que em 2020 era de 51,74%, passou para 21,27%. As classes muito alto e extremo, ambas com significativo incremento, representaram 55,95% e 22,72% da área total.

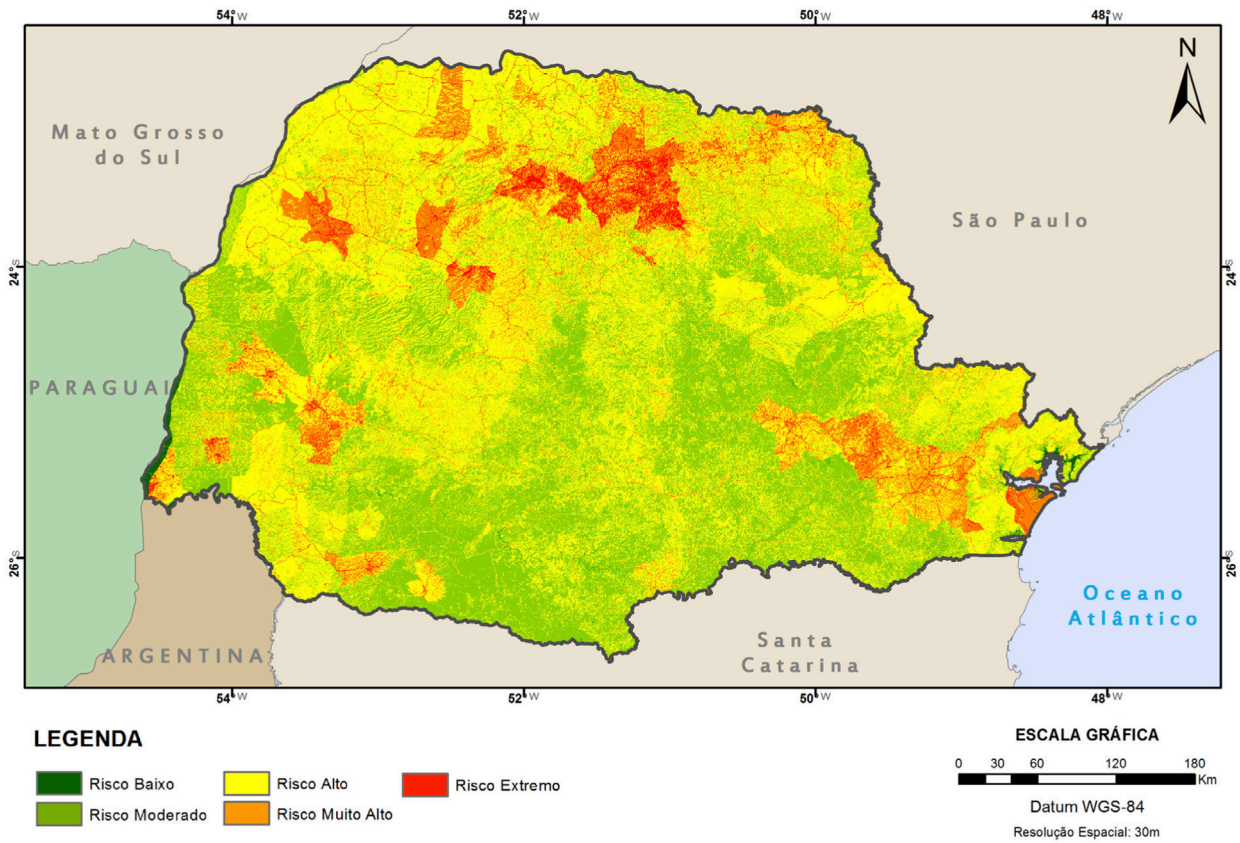


Figura 2. Risco de incêndio florestal em 2020 (melhor cenário).
Figure 2. Risk of wildfire in 2020 (best case scenario).

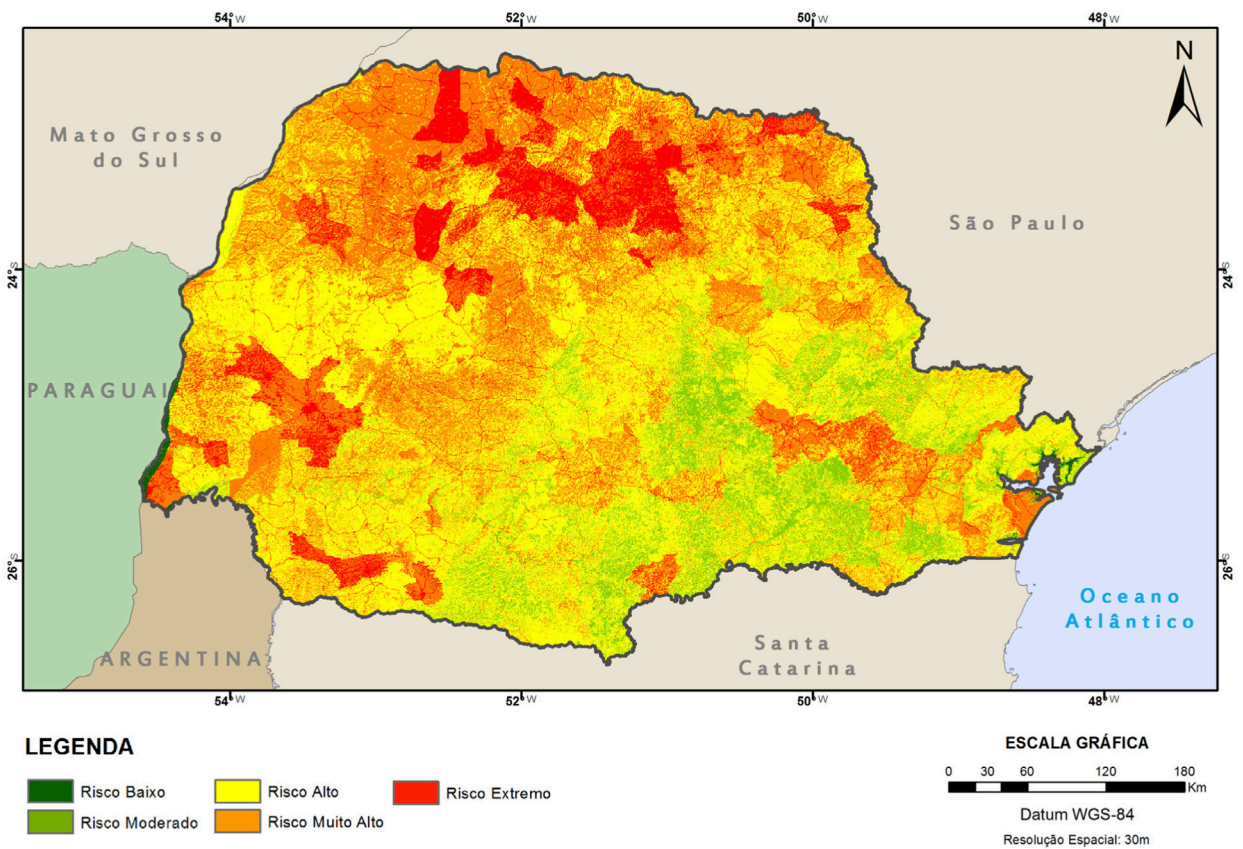


Figura 3. Risco de incêndio florestal em 2100 (melhor cenário).
Figure 3. Risk of wildfire in 2100 (best case scenario).

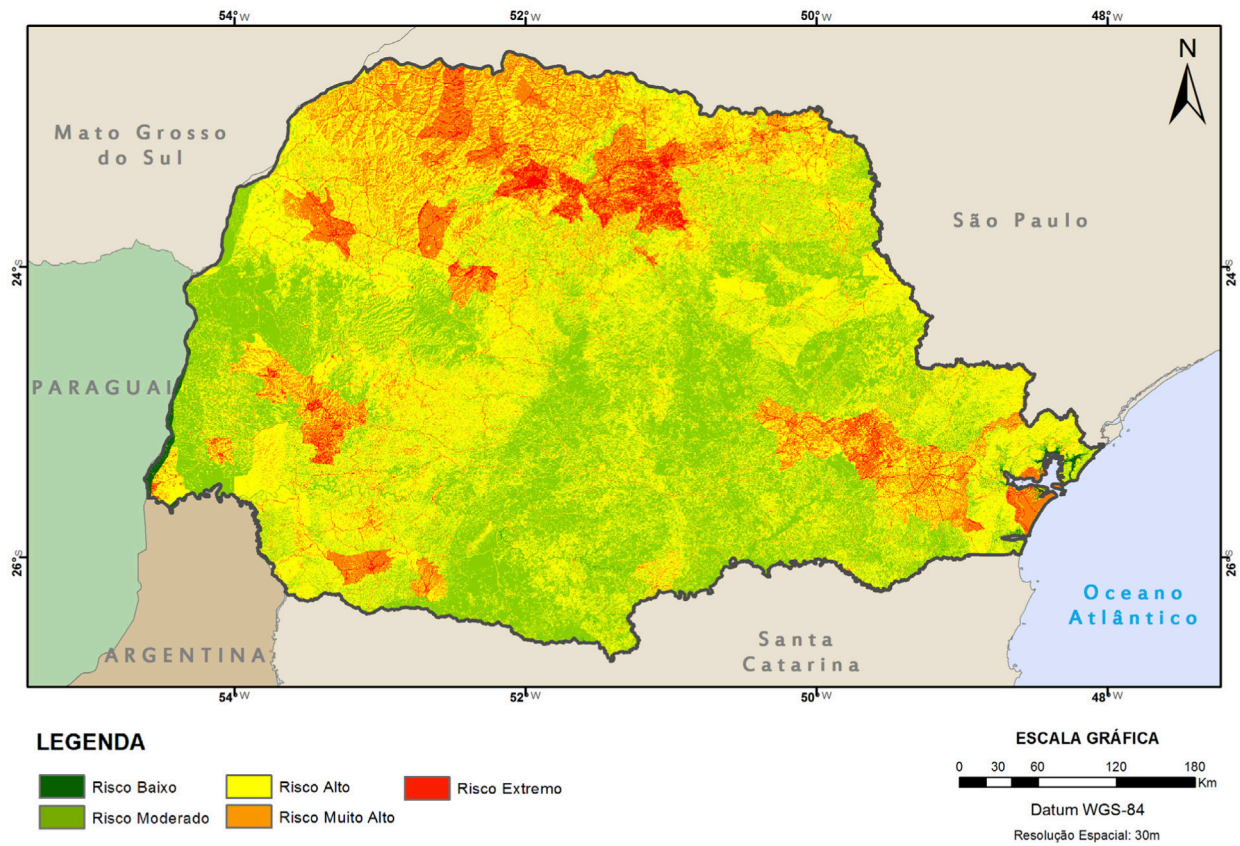


Figura 4. Risco de incêndio florestal em 2020 (piores cenário).
Figure 4. Risk of wildfire in 2020 (worst case scenario).

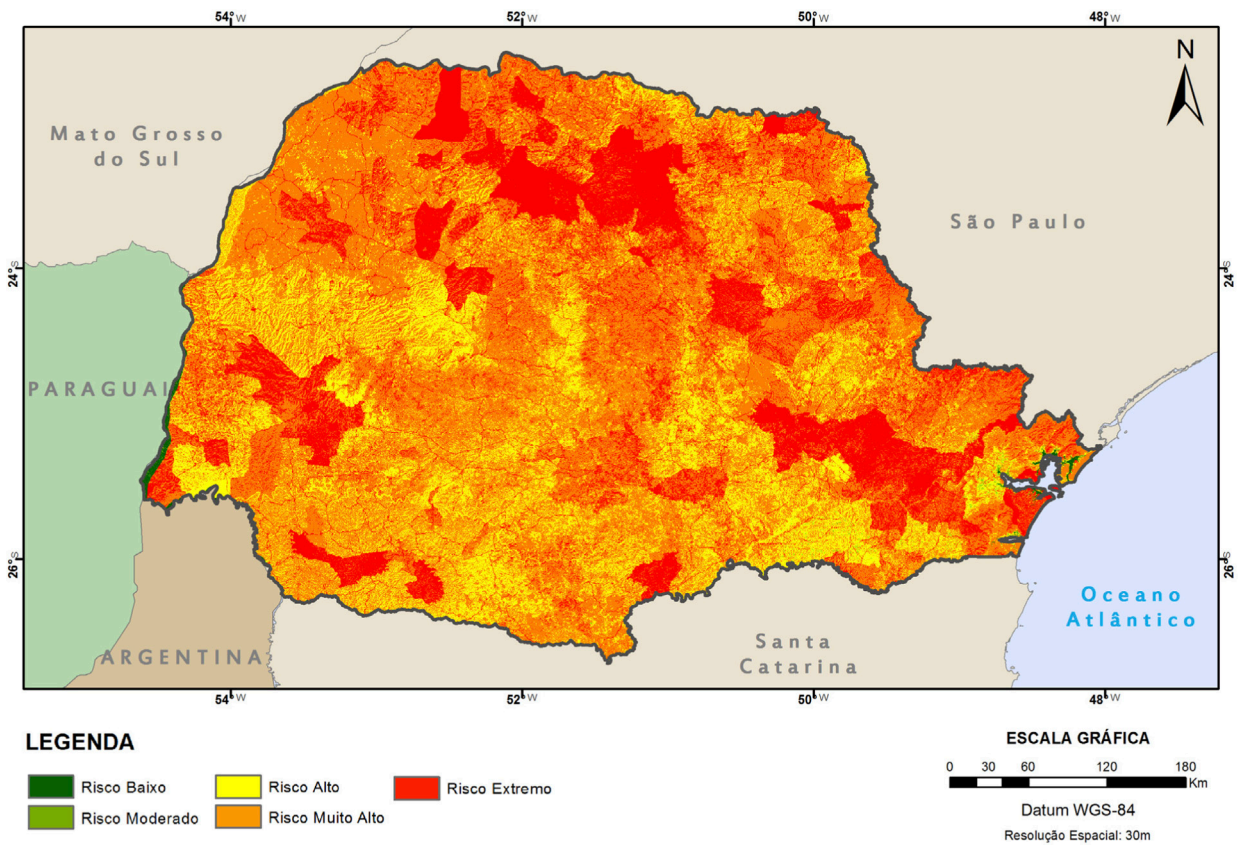


Figura 5. Risco de incêndio florestal em 2100 (piores cenário).
Figure 5. Risk of wildfire in 2100 (worst case scenario).

CONCLUSÕES

As variáveis dinâmicas (densidade demográfica, umidade do material combustível, índice de perigo de incêndios – FMA – e zoneamento de risco de incêndios florestais) apresentaram incremento nas classes mais altas de perigo de incêndios ao longo do tempo. Esse comportamento foi observado tanto para o melhor quanto para o pior cenários de aumento de temperatura (de acordo com o IPCC).

O modelo de integração de dados utilizado demonstrou gerar resultados coerentes, tendo em vista que a espacialização das classes de risco obedeceu uma evolução de acordo com os decêndios.

A hipótese de que haverá um maior risco de incêndios florestais, caso ocorra um aumento na temperatura média da Terra, foi aceita. Conclui-se que, caso se confirmem as previsões do IPCC, haverá um aumento no número de ocorrências de incêndios florestais no estado do Paraná, o que exigirá ações integradas de prevenção e combate a incêndios florestais para minimizar possíveis danos ambientais, sociais e econômicos.

AGRADECIMENTOS

Ao FINEP por possibilitar a realização deste trabalho.

Aos profissionais do IAPAR e SIMEPAR: Paulo Henrique Caramori, Luciane Christina Pinheiro, Roberto Oliveira Santos, Fábio Sato e Livia Maria Pereira por todo o apoio.

Aos bolsistas do Laboratório de Incêndios Florestais da Universidade Federal do Paraná, SIMEPAR e IAPAR: Igor K. Takashina, Regiane Kock de Sousa, Luciana Lauthert Pereira, Rafaela de Assunção, Chaiane Cristina Rech Leiva e João Jankowski Sabóia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAB, H.; KASTURI DEVI KANNIAH, K. D.; SOLAIMANI, K. Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. *Natural Hazards*, v. 65, n. 3, p. 1723 – 1743, 2013.
- ALENCAR, A. A. C.; SOLORZANO, L. A.; NEPSTAD, D. C. Modeling forest understory fires in an eastern amazonian landscape. *Ecological Applications*, Washington, v. 14, n. 4 (Supl.) p. S139 – S149, 2004.
- BROWN, A. A.; DAVIS, K. P. *Forest fire: control and use*. 2. ed. New York: McGraw Hill Book, 1973.
- CARDILLE, J. A.; VENTURA, S. J.; TURNER, M. G. Environmental and social factors influencing wildfires in the Upper Midwest, USA. *Ecological Applications*, Washington, v. 11, n. 1, p. 111 – 127, 2001.
- CHANDLER, C.; CHENEY, P.; THOMAS, P.; TRABAUD, L.; WILLIAMS, D. *Fire in forestry: forest fire behavior and effects*. New York: J. Wiley, 1983.
- CHUVIECO, E.; CONGALTON, R. G. Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. *Remote Sensing of Environmental*, New York, v. 29, n. 2, p. 147 – 159, 1989.
- CHUVIECO, E.; AGUADO, I.; YEBRA, M.; NIETO, H.; JAVIER SALAS, J.; MARTÍN, M. P.; VILAR, L.; MARTÍNEZ, J.; MARTÍN, S.; IBARRA, P.; LA RIVA, J.; BAEZA, J.; RODRÍGUEZ, F.; MOLINA, J. R.; HERRERA, M. A.; ZAMORA, M. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling*, Kidlington, v. 221, n. 1, p. 46 – 58, 2010.
- DER - DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. *Mapa político rodoviário do estado do Paraná*, 2010. Escala 1:200.000.
- FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. *Fire management: global assessment 2006*. Roma: 2007. 159 p. (FAO Forestry Paper, 151).
- FERRAZ, S. F. B.; VETTORAZZI, C. A. Mapeamento de risco de incêndios florestais por meio de sistema de informações geográficas (SIG). *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 53, p. 39 – 48, 1998.
- FLANNIGAN, M. D.; KRAWCHUK, M. A.; GROOT, W. J.; WOTTON, B. M.; GOWMAN, L. M. Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*, v. 18, n. 5, p. 483 – 507, 2009a.
- FLANNIGAN, M. D.; STOCKS, B. J.; TURETSKY, M. R.; WOTTON, B. M. Impact of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology*, London, v. 15, n. 3, p. 549 – 560, 2009b.

- GRODZKI, L.; CARAMORI, P. H.; BOOTSMA, A.; OLIVEIRA, D.; GOMES, J. Risco de ocorrência de geadas no estado do Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 93 - 99, 1996.
- GUILLHERMO JULIO, A. **Método de determinación de prioridades de protección**. Santiago: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, 1992. 27 p. (Manual n. 10).
- HERNANDEZ-LEAL, P. A.; ARBELO, M.; GONZALEZ-CALVO, A. Fire risk assessment using satellite data. **Advances in Space Research**, v. 37, n. 4, p. 741 - 746, 2006.
- IAPAR - INSTITUTO AGRONÔMICO DO ESTADO DO PARANÁ. **Cartas climáticas do estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, 1994. 45 p. (Documento 18).
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2010. **Censo 2010**. Disponível em: . Acesso em: 11/12/2012.
- _____. **Mapa do estado do Paraná**. Brasília: IBGE, 2007. Escala 1:250.000.
- _____. **Anuário estatístico do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2000. v.60
- INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **TOPODATA**: banco de dados geomorfométricos do Brasil 2008. 2008. Disponível em: < www.dsr.inpe.br/topodata/ >. Acesso em: 11 dez. 2012.
- IPCC - INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Relatório do IPCC/ONU: novos cenários climáticos**. Geneva: ONU, 2007. 21 p.
- JAISSWAL, R. K.; KRISHNAMURTHY, J.; MUKHERJEE, S. Regional study for mapping the natural resources prospect & problem zones using remote sensing and GIS. **Geocarto International**, v. 20, n. 3, p. 21 - 31, 2005.
- LIU, Z.; YANG, J.; CHAN Y.; WEISBERG, P. J. Spatial patterns and drivers of fire occurrence and its future trend under climate change in a boreal forest of Northeast China. **Global Change Biology**, London, v. 18, n. 6, p. 2041 - 2056, 2012.
- LIU, Y.; STANTURE, J.; GOODRICK, S. Trends in global wildfire potential in a changing climate. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 4, p. 685 - 697, 2010.
- MAACK, R. **Geografia física do estado do Paraná**. 4. ed. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2012, 526 p.
- MARQUES, S.; BORGES, J. G.; GARCIA-GONZALO, J.; MOREIRA, F.; CARREIRAS, J. M. B.; OLIVEIRA, M. M.; CANTARINHA, A.; BOTEQUIM, B.; PEREIRA, J. M. C. Characterization of wildfires in Portugal. **European Journal Forest Research**, Berlin, v. 130, p. 775 - 784, 2011.
- OLIVEIRA, S.; FRIDERIKE OEHLER, F.; SANMIGUEL-AYANZ, J.; CAMIA, A.; PEREIRA, J. M. C. Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using Multiple Regression and Random Forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 275, n. 1, p. 117 - 129, 2012.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade e Floresta. **PROBIO**: mapa de cobertura vegetal. 2005. Disponível em: < http://homolog-w.mma.gov.br/index.php?id=conteudo_monta&idEstrutura=14 >. Acesso em: 11 dez. 2012.
- SALAS, J.; CHUVIECO, E. Geographic information systems for wildland fire risk mapping. **Wildfire**, Washington, v. 3, n. 2, p. 7 - 13, 1994.
- SHOW, S. B.; CLARKE, B. **Elements of forest fire control**. Roma: FAO, 1953.
- SIMARD, A. J. **The moisture content of forest fuels** - I. Ottawa, Ontario: Forest Fire Research Institute, 1968. 47 p. (Inf. Report FF - X - 14).
- SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. **Incêndios florestais: controle, efeitos e uso do fogo**. Viçosa: Editora UFV, 2007. 250 p.
- SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; NUNES, J. R. S. **Incêndios florestais no Brasil - o estado da arte**. Editora UFV: Curitiba, 2009. 246 p.
- SOUSA, C.; PINHEIRO, D.; GRILO, F.; GUERREIRO, J.; MENDONÇA, M.; CARIDADE, M. L.; CASTRO, M.; MESQUITA, P.; ALMEIDA, R. **Relatório do projeto de cartografia de risco de incêndios florestais**, 1996. Disponível em: < <http://valpacos.no.sapo.pt/relatorioflorestal.html> >. Acesso em: 07 nov. 2013.

- TIAN, X.; SHU, L.; WANG, M.; ZHAO, F. Forest fire danger ratings in the 2040s for northeastern China. *Forestry Studies in China*, v. 13, n. 2, p. 85 – 96, 2011.
- TREWARTHA, G. T.; HORN L. H. *An introduction to climate*. New York: McGraw-Hill, 1980. 416 p.
- VADREVU, K. ·P.; EATURU, A.; BADARINATH, K. V. S. Fire risk evaluation using multicriteria analysis: a case study. *Environmental Monitoring Assessment*, n. 166, p. 223 – 229, 2010.
- VERDE, J. C. *Avaliação da perigosidade de incêndio florestal: Liboa – Portugal*. 2008. 109 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Faculdade de Letras, Departamento de Geografia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2008.
- VIRGENS FILHO, J. S.; FÉLIX, R. P.; OLIVEIRA, P. M.; LEITE, M. de L. *PGECLIMA_R* - gerador estocástico de cenários climáticos. Curitiba: PGClimate, 2011.
- VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. 452 p.
- WESTERLING, A. L.; BRYANT, B.P. Climate change and wildfire in California. *Climatic Change*, v. 87, n. 1, (Supl.), p. S231 - S249, 2008.
- XU, D.; DAI, L.; SHAO, G.; TANG, L.; WANG, H. Forest fire risk zone mapping from satellite images and GIS for Baihe Forestry Bureau, Jilin, China. *Journal of Forestry Research*, v. 16, n. 3, p. 169 – 174, 2005.

Recebido em 07/11/2013

Aceito para publicação em 03/07/2014

