



G

TRUNFOS DE UMA
EOGRAFIA ACTIVA

DESENVOLVIMENTO LOCAL,
AMBIENTE,
ORDENAMENTO
E TECNOLOGIA

Norberto Santos
Lúcio Cunha

COORDENAÇÃO

Nuno Neves^{1,2}, Nuno Guiomar^{1,3}, Marco Freire^{1,2}, João Paulo Fernandes^{1,3}, Lénia Duarte¹

¹ Universidade de Évora

² e-GEO – Centro de Estudos de Geografia e Planeamento Regional

³ ICAAM – Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas

MODELO DE AVALIAÇÃO DA PERIGOSIDADE DE INCÊNDIO FLORESTAL

1. INTRODUÇÃO

A perigosidade de incêndio florestal (PIF) deve reflectir a dificuldade de controlo de um incêndio florestal, sendo comumente determinada pelas características de comportamento potencial do fogo, assim como por medidas da sua severidade (Brown *et al.*, 2003; Fernandes, 2006). Segundo Verde (2008) a cartografia de PIF resulta do produto da probabilidade pela susceptibilidade, que expressa as condições que esse território apresenta para a ocorrência potencial de um fenómeno danoso.

Esta avaliação pode ser efectuada considerando duas escalas temporais de análise (Freire *et al.*, 2002): as dinâmicas ou de curto prazo, e as estruturais ou de longo prazo. As primeiras baseiam-se em parâmetros com variação diária ou horária, como a meteorologia ou a humidade dos combustíveis (e.g. Van Wagner, 1987; Lourenço, 1991; Chuvieco *et al.*, 2004); ao passo que as de longo prazo, se centram em parâmetros temporalmente mais estáveis, como a topografia e a ocupação do solo (e.g. Chuvieco & Congalton, 1989; Pereira & Santos, 2003; IGP, 2008; Verde, 2008).

Todavia, estes modelos não traduzem, a escalas locais, o potencial de propagação nas áreas avaliadas, uma vez que não integram uma dimensão funcional de avaliação de contexto, nem a integração global do espaço de relações considerado, facto que se procurou ultrapassar no contexto da modelação desenvolvida, e que seguidamente se apresenta.

2. DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

2.1. Variáveis em análise

2.1.1. Histórico de incêndios florestais

A análise do histórico de incêndios pode ser relevante em termos do número de incêndios, da área total ardida ou ainda da área média dos incêndios ocorridos numa determinada área (Cruz, 1982). Segundo Fernandes (2004) a probabilidade de ocorrência de incêndios pode ser abordada historicamente, quer através da cartografia de áreas ardidas, que permite a classificação do território em classes de probabilidade de ocorrência quer, alternativamente, através da densidade de ocorrências anual por unidade de área. Verde

(2008) utilizou o histórico de áreas ardidas para determinar os «scores de favorabilidade» ponderando o número de unidades matriciais ardidas pelo número de unidades matriciais por arder, para as várias classes de cada variável integrada no modelo.

A análise dos incêndios ocorridos pode ainda ajudar a isolar os factores determinantes que geraram comportamentos do fogo similares, e que permitem encontrar os pontos de progressão preferencial dos incêndios. Todavia onde a progressão do incêndio é tendencialmente marcada por características locais ou áreas em que a frequência de incêndios é menor, esta análise tende a perder relevância.

2.1.2. Factor topográfico

Os modelos enunciados anteriormente utilizam como variáveis caracterizadoras da morfologia do território os declives e a hipsometria. A hipsometria condiciona indirectamente o comportamento do fogo uma vez que está associada ao tipo de combustível e à sua humidade. Os declives, por sua vez, afectam directamente a progressão do incêndio.

O efeito do declive na propagação do fogo florestal é por demais conhecido mas, a sua utilização numa perspectiva de integração por funções locais (e.g. map algebra) não permite que seja considerada a sua componente direcciona, levando autores como Verde (2008), a referir que “não se pode afirmar com segurança que a relação entre declive e susceptibilidade é linear».

Para valores negativos de declive funcional¹, a frente de chamas inclina-se para o combustível ainda não queimado e dessa forma incrementa-se o fluxo de calor por radiação e consequentemente a velocidade de propagação (Viegas, 2006).

A dificuldade em utilizar o declive num processo de modelação do comportamento do fogo decorre da natureza anisotrópica do efeito do declive conforme a direcção de propagação. Assim, a integração dos factores topográficos num modelo de avaliação da PIF deverá considerar uma avaliação do comportamento do fogo segundo o seu potencial direcciona de propagação.

A modelação inovadora desenvolvida integra o factor declive como uma variável de transporte numa função de acumulação de escoamento difuso. Considerando que a acumulação de escoamento traduz uma medida da quantidade de células drenantes para cada célula e que é possível efectuar um somatório de uma variável de transporte associada ao processo de acumulação de escoamento então o valor de declive pode ser utilizado como variável de transporte, traduzindo a sua «acumulação» uma métrica do potencial de propagação a montante de cada local.

A utilização de uma função de acumulação de escoamento difuso para quantificar o factor topográfico considera assim uma medida do potencial de propagação ascendente do incêndio florestal integrando o declive como factor global (decorrente do contexto geral de «escoamento» em cada bacia), permitindo caracterizar para cada local ou célula do terri-

¹ O conceito de declive funcional (Neves, 2001) descreve uma avaliação da acção do declive segundo uma orientação de progressão através da comparação entre a direcção angular do declive e a direcção ou orientação que estamos a considerar. O declive funcional é descrito pela fórmula $Df = (\cos(A-B)) * D$, sendo A e B os ângulos considerados e D o declive do terreno.

tório o seu potencial de alastramento ou propagação enquanto métrica da quantidade e valor dos locais ou células potencialmente atingíveis.

Considerando a natureza conservativa da função de acumulação de escoamento foi introduzido um parâmetro de ponderação estabelecendo uma relação entre os valores acumulados e a totalidade de células drenantes, introduzindo assim uma medida de atenuação que se considera aproximar adequadamente o fenómeno em modelação.

2.1.3. Combustíveis florestais

Os combustíveis florestais podem ser definidos pelas características das partículas de biomassa, viva e/ou morta, que contribui para a propagação, intensidade e severidade dos fogos florestais (Burgan e Rothermel, 1984).

A integração dos combustíveis florestais num modelo de avaliação da PIF pode ser feita através da atribuição de valores de susceptibilidade a classes de ocupação do solo (Verde, 2008), ou através do uso de modelos de combustível (Cruz, 2005) com base em dados de ocupação do solo ou levantamentos de campo realizados para o efeito. Fernandes (2006) propõe ainda um modelo expedito para avaliação da PIF que relaciona os declives com os modelos de combustível.

2.2. O processo geral de modelação

Se considerarmos todo o território como um ponto potencial de ignição, o potencial de propagação de um incêndio será tanto maior quanto maior for o comprimento da encosta disponível para a sua propagação². No entanto, considerando que a propagação de um incêndio é um fenómeno difuso com uma dinâmica de alastramento muito marcada, o estabelecimento de uma métrica global de potencial de propagação baseada unicamente no comprimento da encosta, não se afigura satisfatório pois traduziria unicamente a via preferencial de propagação sem considerar o alastramento lateral que se verifica efectivamente.

Para estabelecer uma métrica global de potencial e efeito de propagação de um incêndio florestal baseada numa avaliação do terreno envolvente importa que se considerem diversos factores e perspectivas de modelação:

- O potencial de propagação deverá ser uma expressão do comprimento da encosta numa perspectiva de modelação de contexto, considerando um alastramento lateral difuso do fenómeno de propagação;
- A métrica adequada resulta de uma transformação da função de acumulação de escoamento (flow accumulation), que mede a quantidade de células drenantes para cada célula, permitindo igualmente associar a essa avaliação uma quantificação resultante da acumulação ou «transporte» de uma variável associada;
- A variável de transporte pode ser definida como uma integração de subvariáveis ou dimensões do fenómeno ou separadamente numa perspectiva de modelação individualizada para posterior integração;

² Na análise que agora se apresenta não se terá em consideração o factor vento.

- A acumulação difusa final pode resultar da integração de acumulações difusas parcelares ou do cálculo de uma acumulação difusa única a partir de um terreno virtual «deformado» pela integração prévia das variáveis ou factores parcelares.
- O cálculo da acumulação difusa deverá ser efectuado numa perspectiva multi-escala (aqui entendida como factor de resolução ou tamanho da célula), limitando os efeitos locais que podem afectar a dimensão contextual do processo de modelação.

Considerando que o processo de modelação que se apresenta assenta largamente numa função de acumulação difusa de «escoamento», são de seguida enunciadas as principais contribuições metodológicas que permitiram o desenvolvimento deste novo processo de modelação.

Quinn *et al.* (1991) desenvolveram um índice que a partir do pré-processamento dos dados do modelo digital de elevações permite calcular a distribuição do escoamento em função do índice topográfico:

$$In = \frac{a}{\tan \beta},$$

em que a representa os valores acumulados de área drenante no ponto em avaliação e $\tan \beta$ o ângulo de declive. O parâmetro a é dado pela seguinte expressão:

$$a = \frac{A}{L},$$

em que A é a área drenante total e L o comprimento da encosta

Desenvolvido para interpretar as acumulações de escoamento de água numa bacia hidrográfica, este índice reflecte a tendência para a acumulação de escoamento em qualquer ponto do espaço em análise, em função do comprimento da encosta e da tendência para a descida dos materiais ao longo da encosta em função da gravidade (expressa pelo declive).

O modelo descrito no presente artigo distribui o escoamento por todas as direcções de escoamento, no sentido descendente da encosta, de modo a que cada fracção da área que drena através de cada elemento da grid seja proporcional ao valor do declive, e assim declives mais acentuados aumentam o processo de acumulação na sua direcção preferencial de escoamento, deduzida a partir de:

$$\Delta A = \frac{A(\tan \beta_i \cdot L_i)}{\sum_{j=1}^{n=1} (\tan \beta_j \cdot L_j)}$$

em que n representa o número total de direcções no sentido descendente da encosta, ΔA_i a quantidade de escoamento que passa na célula i , A é a área total acumulada que drena na célula em análise, $\tan \beta$ o declive, e L o comprimento da vertente.

2.3. Síntese do processo geral de modelação

A perspectiva de modelação tendo por base a acumulação de escoamento permite conceber a sua aplicação como metáfora de uma avaliação do potencial de perigosidade, considerando o estabelecimento de uma métrica espacial global que integra:

- Comprimento da encosta potencial da propagação, como medida da potencial área a ser afectada por uma ignição em cada célula, traduzido pelo cálculo da acumulação de escoamento difusa segundo o modelo MD – Multiple Flow Algorithm (Schäuble *et al.*, 2008);
- Contributo da acumulação ponderada do declive, como medida da influência direccional do declive, traduzida pelo cálculo de uma função integrando a acumulação do declive e a sua ponderação pela acumulação de escoamento standard, permitindo a representação de um efeito de «travagem» ou «desaceleração»;
- Contributo da acumulação de valores relacionados com modelos de combustível, como medida de factores locais como a velocidade de propagação (VP), a ignição do copado (IC), a dificuldade de rescaldo (DR) e a intensidade da frente (IF), adaptados de Cruz (2005) para características de ambiente do fogo associadas a situações extremas.

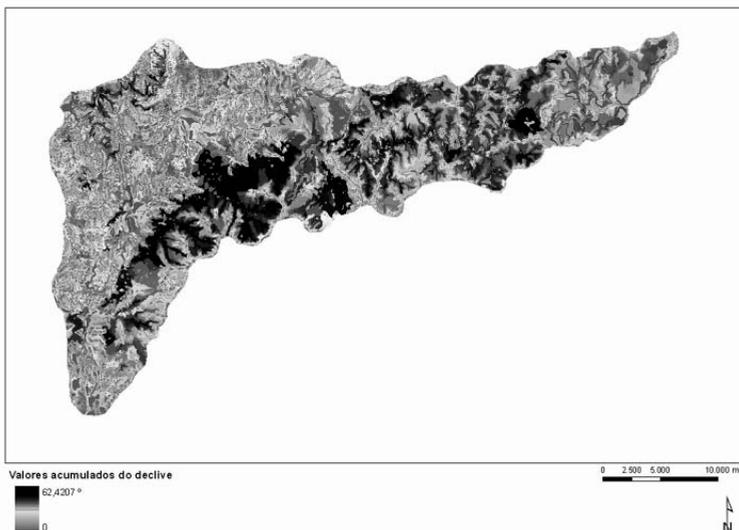
875

3. RESULTADOS

Como parcela de estudo foi seleccionada uma sub-bacia do Rio Mondego, pelo histórico de incêndios florestais na região, e pelo facto da validade das métricas e/ou parâmetros a gerar, resultantes do cálculo de acumulações de escoamento, decorrer de se considerar toda a área drenante. As variáveis independentes são:

1. Acumulação de declives ponderada [AD]

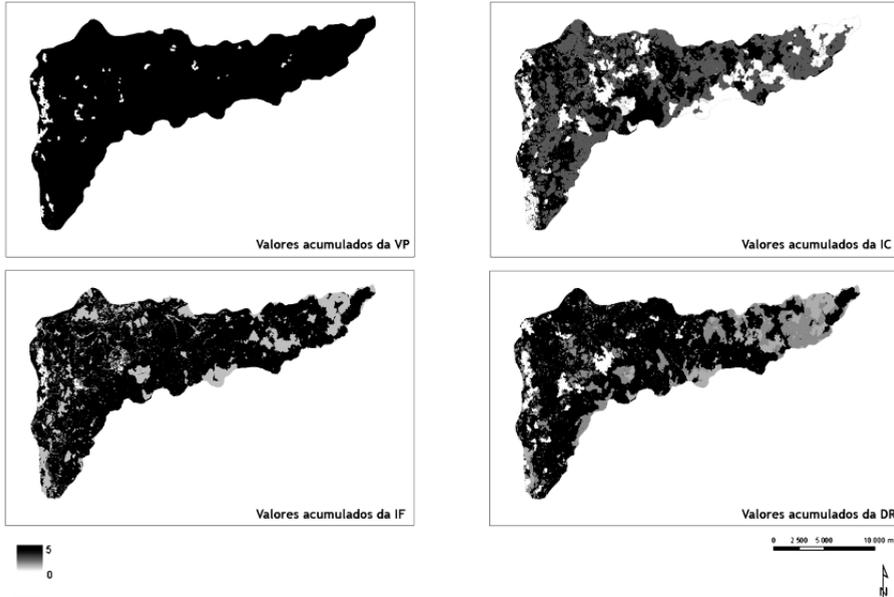
Figura 1 – Resultado da acumulação de declives



2. Acumulação sobre o relevo adaptado de valores relacionados com os modelos de combustível (Figura 2).

876

Figura 2 – Acumulação dos valores da VP, IC, IF e DR



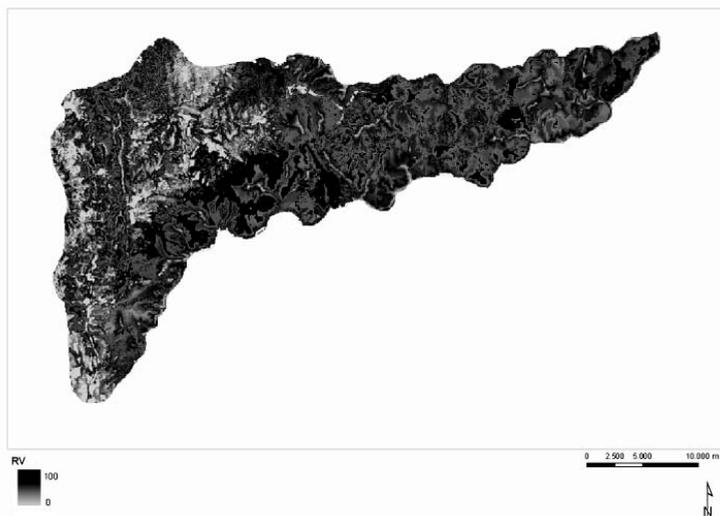
Neste primeiro teste à aplicação da nova metodologia foi considerada como variável dependente o número de incêndios verificado na área. Os autores estão conscientes das limitações desta variável, uma vez que não permite uma associação directa entre a perigosidade e as variáveis estruturais concebidas. No entanto constitui a melhor aproximação disponível, pois não existem dados sobre locais de ignição, nem relação estabelecida entre o local de ignição e o «sucesso» do fogo em termos de área ardida e outras variáveis de avaliação. A análise exploratória permitiu estabelecer uma regressão linear múltipla descrita pela expressão (valores acumulados): $INC_N = -0,42 + 0,62 * DECLIVE + 0,02 * VP - 0,06 * IC + 0,04 * DR + 0,10 * IF$

Quadro 2 – Matriz de correlações entre as variáveis

Variáveis	A correlações assinaladas são significativas para $p < 0,05$ N = 200					
	INC_SUM	AD (ACC)	VP (ACC)	IC (ACC)	DR (ACC)	IF (ACC)
INC_SUM	1,00	0,70	0,32	0,04	0,23	0,37
AD – (ACC_D)	0,70	1,00	0,32	0,15	0,23	0,39
VP – (ACC_VP)	0,32	0,32	1,00	0,24	0,63	0,82
IC – (ACC_IC)	0,04	0,15	0,24	1,00	0,48	0,39
DR – (ACC_DR)	0,23	0,23	0,63	0,48	1,00	0,75
IF – (ACC_D)	0,37	0,39	0,82	0,39	0,75	1,00

* NOTA: INC_SUM – Número de incêndios (1990-2008, Fonte: AFN), AD – Acumulação de declives ponderada, VP/IC/DR/IF (ACC) – Valores acumulados relativos aos combustíveis

Figura 3 – Resultados obtidos pela aplicação da equação de regressão



A implementação da expressão de regressão linear múltipla permite a geração de um «relevo virtual», que resulta da representação do valor inverso da acumulação integrada segundo a expressão definida, constituindo uma representação das relações identificadas entre as variáveis.

Este é uma integração de acumulações de escoamento e constitui uma metáfora do terreno, podendo ser explorado como modelo do mesmo para o propósito de representação definido. A representação espacial dos resultados do modelo desenvolvido constitui uma métrica da susceptibilidade do território a incêndios através da integração de acumulações difusas parcelares.

4. CONCLUSÕES

Os modelos correntemente utilizados em Portugal para a avaliação da PIF centram-se essencialmente em factores relacionados com a severidade, propagação (tendo em conta apenas a disponibilidade de combustível e o declive), e a probabilidade de ocorrência recorrendo ao histórico de incêndios. Contrariamente ao que aqui se apresenta, estes não consideram cada ponto do espaço como um potencial local de ignição, a partir do qual existem direcções potenciais de propagação, que traduzem o contexto territorial de forma a determinarem bacias de propagação.

A abordagem desenvolvida permite indicar quais áreas críticas, susceptíveis de gerarem incêndios de maior dimensão e mais severos, representando uma caracterização de contexto global integrando especificidades locais. Considera-se que a modelação experimental aqui apresentada constitui um ponto de partida para o desenvolvimento de novas metodologias de avaliação da perigosidade de incêndio florestal, sendo fundamental a realização de processos de aquisição e formalização de conhecimento espacial que permitam traduzir com maior precisão a complexidade das relações e fenómenos envolvidos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

878

- Brown, J. K., Reinhardt, E. D. & Kramer, K. A. 2003, *Coarse woody debris: managing benefits and fire hazard in the recovering forest*, General Technical Report RMRS-GTR-105, US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Burgan, R. E. & Rothermel, R. C. 1984, *BEHAVE: Fire behaviour prediction and fuel modeling system – fuel subsystem*, USDA Forest Service General Technical Report INT-167, USDA, St. Paul.
- Chuvieco, E., Cocero, D., Riaño, D., Martín, P., Martínez-Vega, J., Riva, J. & Pérez, F. 2004, 'Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger', *Remote Sensing of Environment*, vol. 92, pp. 322-331.
- Chuvieco, E. & Congalton, R. G. 1989, 'Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping', *Remote Sensing of Environment*, vol. 29, pp. 147-159.
- Cruz, C. S. 1982, 'Fire propagation risk in a forest park', in *Forest fire prevention and control*, ed. T. van Nao, Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers, London.
- Cruz, M. G. 2005, *Guia fotográfico para identificação de combustíveis florestais – Região Centro de Portugal*. ADAI-CEIF, Coimbra.
- Fernandes, P. 2004, *Orientações para a análise do risco, vulnerabilidade aos incêndios e zonagem do território*, Relatório interno para o PDFCI, APIF, Miranda do Corvo.
- Fernandes, P. 2006, *Uma metodologia expedita de classificação do perigo de incêndio para os Planos de Gestão Florestal*, Departamento Florestal, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.
- Freire, S., Carrão, H. & Caetano, M. 2002, 'Produção de cartografia de risco de incêndio florestal com recurso a imagens de satélite e dados auxiliares', *ESIG 2002*, Oeiras.
- IGP 2008, 'Cartas de Risco de Incêndio Florestal: Nova Série 2006-2008', Disponível em: <http://scrif.igeo.pt/cartografiacrif/2007/metodologia.html>.
- Lourenço, L. 1991, 'Uma formula expedita para determinar o índice meteorológico de risco de eclosão de fogos florestais em Portugal', *Cadernos Científicos sobre Incêndios Florestais*, vol. 2, pp. 3-63.
- Neves, N. 2001, 'Knowledge discovery method for propagation phenomena modelling', *16th ESRI-EMEA User Conference*, Lisboa.
- Pereira, J. M. C. & Santos, M. T. 2003, *Áreas queimadas e risco de incêndio em Portugal*, Direcção-Geral das Florestas, Lisboa.
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. & Planchon, O. 1991, 'The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models', *Hydrological Processes*, vol. 5, pp. 59-79.
- Schäuble, H., Marinoni, O. & Hinderer, M. 2008, 'A GIS-based method to calculate flow accumulation by considering dams and their specific operation time', *Computers & Geosciences*, vol. 34, pp. 635-646.
- Van Wagner, C. E. 1987, *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*, Forestry Technical Report 35, Canadian Forestry Service, Ottawa.
- Verde, J. C. 2008, *Avaliação da perigosidade de incêndio florestal*, Dissertação de mestrado, Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa.
- Viegas, D. X. 2006, 'Modelação do comportamento do fogo', in *Incêndios florestais em Portugal: caracterização, impactes e prevenção*, eds. J. S., Pereira, J. M. C., Pereira, F. C. Rego, J. M. N. Silva & T. P. Silva, T. P., ISA Press, Lisboa.
- Viegas, D. X. & Pita, L. P. 2004, 'Fire spread in canyons', *International Journal of Wildland Fire*, vol. 13, no. 3, pp. 1-22.

AGRADECIMENTOS

Marco Freire agradece o financiamento das suas actividades de investigação pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no âmbito da Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/21456/2005 ao abrigo do programa POCI 2010. Nuno Guiomar agradece o financiamento das suas actividades de investigação pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no âmbito da Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/35848/2007 ao abrigo do programa POS_C – Desenvolver Competências – Medida 1.2.