



Inês Lopes da Fonseca ~ CEG-IGOT,
ilfonseca@yahoo.com

O potencial da aplicação de lógica difusa na cartografia de solos

Recursos Naturais e Ordenamento do Território

Resumo

Avanços tecnológicos em hardware e software têm vindo a permitir uma mais fácil aplicação dos conceitos de lógica difusa para lidar com os problemas da incerteza e da imprecisão, aspectos intrínsecos dos sistemas naturais. O sistema solo é um exemplo de um sistema natural no qual os processos de formação e desenvolvimento dos perfis do solo não operam pontualmente no espaço geográfico mas, geralmente, de uma forma contínua, com alteração gradual das características do material solo ao longo das vertentes. Assim, a aplicação da lógica difusa permite a formalização do nosso conhecimento acerca da variação espacial das características dos solos o que, potencialmente, conduz à produção de uma melhor cartografia de base deste recurso natural.

Contudo, até agora, o potencial desta técnica não foi devidamente explorado na modelação do solo-paisagem, sobretudo ao nível do factor morfologia da paisagem, ou seja, no delineamento de formas de relevo que se crê apresentarem o mesmo ambiente pedo-formativo e que são utilizadas para identificar áreas com o mesmo tipo de solo. Além da escolha de diferentes funções de pertinência aplicáveis entre um elemento (neste caso específico, um pixel ao qual estão associados valores numéricos de diferentes parâmetros topográficos) e os conjuntos aos quais pode pertencer (isto é, as diferentes classes de formas de relevo) que podem ser utilizadas para lidar com a natureza contínua de variação do solo, a parametrização destas funções constitui a parte mais complexa no desenvolvimento de um sistema difuso. Isto é, a definição dos parâmetros das funções de pertinência que substituem limites nítidos ou únicos

por limites difusos entre classes de formas de relevo é difícil, por ser bastante subjectiva, de decisão arbitrária e dependente dos objectivos com que se produz o mapa de formas de relevo.

Assim, apresenta-se o desenvolvimento de um modelo difuso de formas de relevo parametrizado para a Marina Baixa (província de Alicante, no Sudeste de Espanha) aplicando funções de pertinência trapezóides a um conjunto de atributos topográficos que são factores condicionantes do desenvolvimento e variação espacial do solo.

Primeiro são identificadas formas de relevo gerais que são importantes para a variação espacial do solos e cada forma de relevo é caracterizada por um número variável de funções de pertinência para diferentes parâmetros topográficos. Os mapas resultantes, um para cada forma de relevo, são então desfuzificados de forma a produzir um mapa único de classificação de formas de relevo, que depois é comparado com um mapa de formas de relevo desenvolvido através da aplicação da lógica booleana.

A análise comparativa dos resultados mostra que um quinto dos píxeis na área da Marina Baixa muda de classe de forma de relevo consoante a aplicação da lógica booleana ou difusa. Apesar de haver na generalidade um grau elevado de concordância entre os dois mapas de formas de relevo finais, algumas das classes de relevo são bastante diferentes. A classificação baseada na aplicação de lógica difusa é simultaneamente a que melhor separa as classes de formas de relevo e consegue detectar e incorporar mais variabilidade topográfica. Assim, a lógica difusa tem um enorme potencial para melhorar a qualidade e a precisão da cartografia tradicional de solos (mapas produzidos utilizando uma lógica booleana) permitindo uma parametrização mais detalhada do modelo fisiográfico que lhe serve de base.

Palavras Chave: Lógica difusa, cartografia de solos, formas de relevo

1. Introdução

Os solos têm um papel fundamental no uso sustentável do território. A sua importância na gestão ambiental tem vindo a aumentar consideravelmente nos últimos anos devido aos problemas relacionados com a sua degradação. No entanto, mesmo a nível Europeu, um número considerável de países (McBratney *et al.*, 2003), incluindo Portugal, não têm uma cobertura completa de cartas de solos para efeitos de gestão ambiental. Isto deve-se aos custos elevados associados a trabalho intensivo de campo e laboratório que é necessário realizar para obter esta cartografia.

A cartografia de solos tradicional é baseada no modelo taxonómico de solos, i.e. as unidades cartografadas de solos são classes que reflectem uma classificação baseada na génese e nas propriedades morfológicas do solo. Contudo, esta abordagem tende a produzir mapas cujas manchas de solos apresentam uma enorme variabilidade interna das propriedades dos solos (Mulla e McBratney, 2000) e uma correlação limitada entre as unidades-solo e os parâmetros hidrológicos dos solos (Western and Grayson, 2000). Por outro lado, a utilização de valores médios a partir de mapas de pequena escala (como por exemplo o Corine Land Cover) é

insuficiente porque muitos dos processos hidrológicos tidos em conta em gestão ambiental são não-lineares. Também a amostragem para pequenas áreas de estudo tende a não cobrir uma área suficientemente vasta para caracterizar a variação espacial de um número elevado de tipos de solos, e tem sido uma técnica apontada como sendo incapaz de capturar os efeitos da heterogeneidade espacial do binómio solo-paisagem (Brath e Montanari, 2000; Vertessy *et al.*, 2000; Brunner *et al.*, 2004). A abordagem que tem vindo a ser desenvolvida mais recentemente para cartografar solos em áreas relativamente extensas utiliza a modelação de variáveis ambientais que são factores de formação do solo e que reflectem a natureza da variação espacial dos solos (Irvin *et al.*, 1997; Zhu *et al.*, 1997; MacMillan *et al.*, 2000), *i.e.* uma abordagem fisiográfica.

O modelo fisiográfico de cartografia de solos requiere a classificação *a priori* do relevo, sendo premissa principal deste modelo que áreas pertencentes à mesma classe de forma de relevo apresentam uma resposta hidrológica e um desenvolvimento pedológico semelhante se a litologia for a mesma (MacMillan *et al.*, 2000; Lopes da Fonseca, 2005), e consequentemente, têm o mesmo tipo de solo.

Porém, os processos envolvidos no desenvolvimento dos solos não operam de uma forma discreta mas de forma que se produz uma transição gradual entre tipos de solos ao longo das vertentes (Odeh *et al.*, 1992). Além disto, a imprecisão e a incerteza são características inerentes dos sistemas naturais (McBratney e Odeh, 1997), dos quais o sistema solo é um bom exemplo.

A lógica difusa é uma extensão da lógica booleana que admite valores lógicos intermédios entre o “falso” (0) e o “verdadeiro” (1) e a sua implementação permite a avaliação de conceitos não-quantificáveis. As funções de pertinência trapezóides (também conhecidas como funções de grau de associação ou compatibilidade) utilizadas em lógica difusa: a) em oposição à lógica booleana, permitem a integração de aspectos não-lineares entre as formas de relevo e as características dos solos nas zonas de transição entre classes de formas de relevo; b) ao contrário das funções derivadas da função normal, permitem a atribuição de grau de compatibilidade máximo (*i.e.* 1) para um conjunto de valores de atributos topográficos.

Com as tecnologias disponíveis actualmente, tais como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), é possível uma recolha e armazenamento de grande quantidade de dados espaciais, incluindo aqueles que são considerados factores determinantes de formação e desenvolvimento dos solos (topografia, litologia, vegetação e clima). Também o avanço de técnicas como o reconhecimento de padrões e a lógica difusa, torna possível cartografar a distribuição dos tipos e propriedades de solos de um modo mais económico, consistente e flexível, baseando-se nas características da paisagem que funcionam como indicadores para os diferentes tipos de solos. Contudo, não só não existem ainda bastantes estudos de aplicação de lógica difusa à modelação do solo-paisagem porque o seu sucesso parece depender largamente da existência de gradientes ambientais fortes (Zhu *et al.*, 1997), como os estudos que existem têm sido sobretudo desenvolvidos para métodos de classificação automática não supervisionada (Irvin *et al.*, 1997; Odeh *et al.*, 1992; McBratney e Odeh, 1997; de Gruitjer *et al.*, 1997), em vez de

métodos supervisionados (Zhu et al., 1997; MacMillan et al., 2000), como é o caso do método utilizado neste estudo.

Assim, o principal objectivo deste trabalho é testar a hipótese de que a aplicação da lógica difusa à modelação fisiográfica, utilizada como base para a cartografia de solos, tem potencial para reflectir a natureza contínua do solo ao longo das vertentes. Para isso desenvolve-se um modelo fisiográfico aplicável a diferentes áreas do território e a diferentes escalas, e que permita derivar propriedades de solos (ou tipos de solos) de uma forma automática.

2. Metodologia

Foi seleccionada a área de Marina Baixa (Figura 1), comarca valenciana no Sudeste de Espanha na zona costeira da província de Alicante, como área de estudo porque possui diversidade topográfica, geológica, climática e ecológica. Trata-se de uma área com recursos naturais fortemente sujeitos a pressões populacionais, especialmente as relativas ao turismo, com uma elevada necessidade de consumo de água e actualmente sem cobertura cartográfica de solos.

Para desenvolver um modelo de formas de relevo difuso, *i.e.* um modelo fisiográfico contínuo desenvolvido com recurso à lógica difusa, é necessário (1) identificar e definir as formas de relevo a serem classificadas, ou seja, os protótipos das classes; (2) seleccionar as variáveis topográficas (primitivas) para caracterizar as classes de relevo; (3) parametrizar as funções de pertinência (identificação de limiares topográficos relevantes para a variação da pedogénese) necessárias para quantificar cada característica das classes de relevo e combiná-las para cada forma de relevo; (4) fuzificar as diferentes variáveis topográficas; (5) classificar toda a área em estudo nas diferentes formas de relevo por combinação de várias variáveis topográficas fuzificadas.

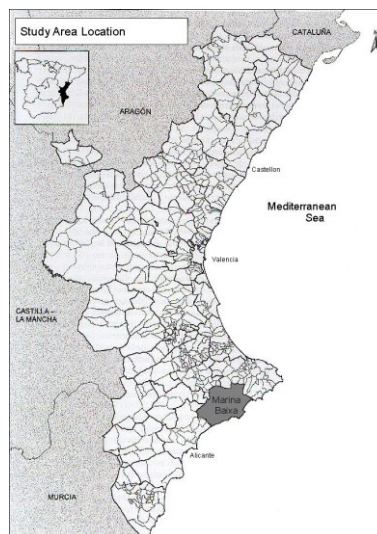


Figura 1 – Localização da Marina Baixa, área de estudo na província de Alicante.

2.1 Definição dos protótipos de classes de relevo

Assim, escolheu-se o modelo de classes de formas de relevo desenvolvido por Ruhe e Walker (1968) porque é suficientemente geral e abrangente (Figura 2). Além das 5 classes em que se segmentam as vertentes (topo – Su (summit), vertente superior – Sh (shoulder), vertente média – Bs (backslope), vertente inferior – Fs (footslope) e sopé – Ts (toeslope), as vertentes são também

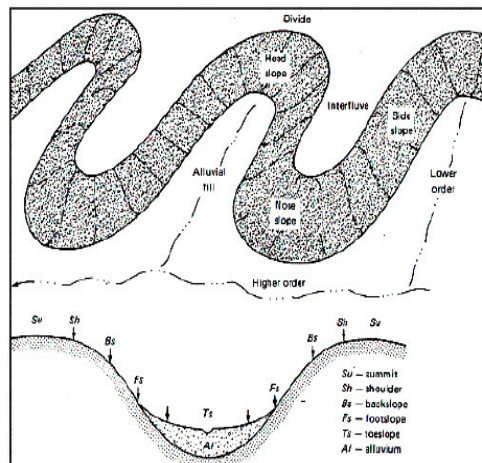
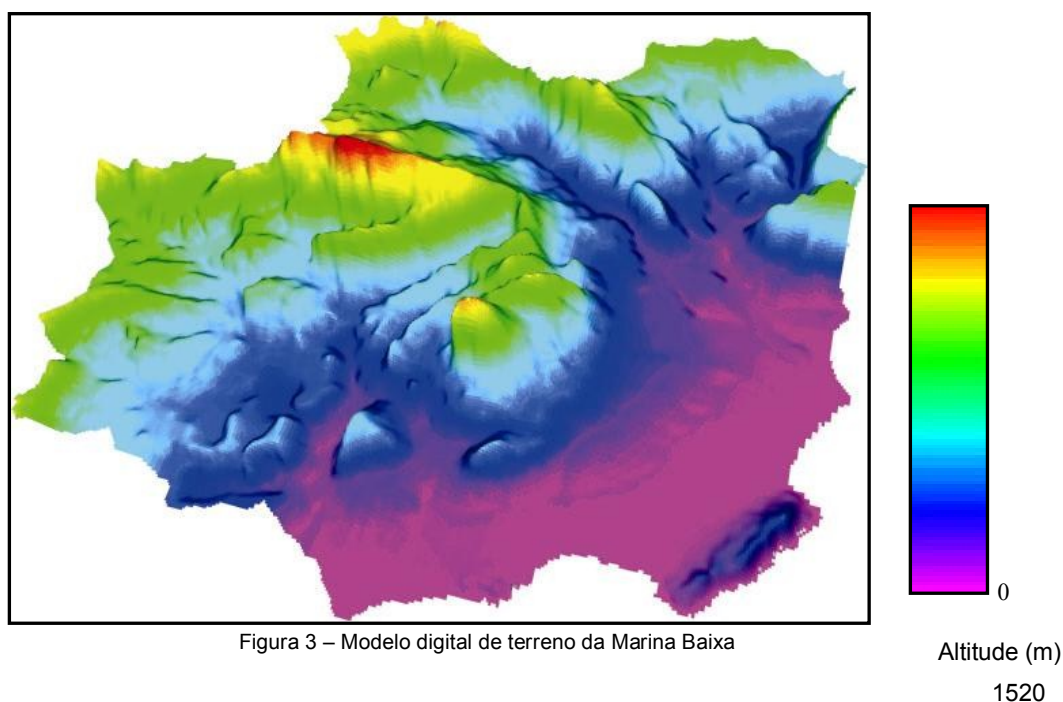


Figura 2 – Classes de forma de relevo no modelo de Ruhe e Walker (1968)

caracterizadas pela a) sua forma geométrica (linear, côncava ou convexa), que combinadas indicam áreas de dissipação, trânsito ou acumulação de fluxos de matéria e energia, e b) pelo seu regime térmico, que separa áreas mais quentes e secas das mais frias e húmidas.

2.2 Selecção de primitivas para caracterizar protótipos das classes

Utilizando um modelo digital de terreno da Marina Baixa com uma resolução de 100m, derivaram-se as variáveis topográficas necessárias para caracterizar a posição, forma geométrica e regime térmico das classes de relevo. Para caracterizar a posição (5 classes do modelo de Ruhe e Walker, 1968) utilizou-se a área de drenagem *versus* oito outras variáveis topográficas (altitude, declive, perfil longitudinal, perfil transversal, área de dispersão (o oposto de área de drenagem), índices de humedecimento, de dispersividade e de caracterização de terreno). Para caracterizar as 3 classes de forma de vertente utilizou-se simplesmente os perfis longitudinal e transversal. Para caracterizar o regime térmico, calculou-se a radiação solar potencial que indica o número máximo de horas de incidência solar.



Apesar de poderem aparecer um número muito elevado de combinações das classes anteriores (5 posições topográficas x 3 formas geométricas x 2 regimes térmicos), não se espera que existam todas aquelas classes. Por exemplo, a vertente superior (do inglês, “shoulder”) só pode ter uma forma convexa, enquanto que os topos, sendo relativamente planos, não deverão ter um regime térmico diferenciado.

2.3 Parametrização das funções de pertinência

Tal como existem diferentes tipos de distribuições probabilísticas (normal, log-normal, Poisson, etc) também existem diferentes funções de pertinência (ou funções de associação). Foi

escolhida a função trapezóide porque permite a integração de aspectos não-lineares entre as formas de relevo e as características dos solos nas zonas de transição entre classes de formas de relevo e, simultaneamente, permitem a atribuição de grau de compatibilidade máximo (*i.e.* 1) para um conjunto de valores de atributos topográficos.

Assim, por exemplo, a função de pertinência que classifica uma determinada área como tendo as características de topo combina duas funções: uma que classifica o terreno como sendo relativamente plano (geometria) e é uma função derivada da variável declive (Figura 4), e outra que classifica o terreno como apresentando uma área de drenagem relativamente baixa, e portanto, aparecendo numa posição topográfica relativamente alta (Figura 5).

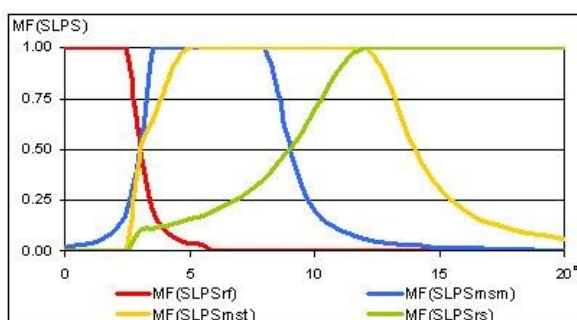


Figura 4 – Função de pertinência que caracteriza o declive (°) do terreno MF(SLPS) como sendo relativamente plano MF(SLPSrf), moderadamente inclinado MF(SLPSmsm), acentuadamente inclinado MF(SLPSmst) ou bastante inclinado MF(SLPSrs)

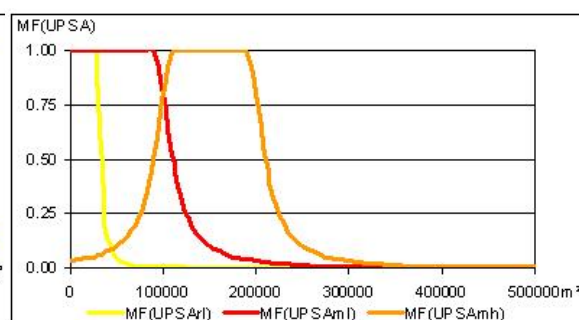


Figura 5 – Função de pertinência que caracteriza a área de drenagem MF(UPSA) como sendo bastante baixa MF(UPSArl), moderadamente baixa MF(UPSAmI) ou moderadamente alta MF(UPSAmh)

Por exemplo, a função que define terreno relativamente plano atribui um grau de associação igual a 1 para todas as áreas com declive igual ou inferior a 2,5°, um grau de associação 0 se o declive for igual ou superior a 6°, e uma transição gradual de grau de associação entre]0,1[para valores de declive entre 6° e 2,5°.

Portanto, primeiro foram identificados limiares topográficos relevantes para a variação da pedogénese, baseados na literatura científica ou por análise do padrão de agregação de variáveis morfológicas no sentido da direcção da drenagem (Lopes da Fonseca, 2005), seguindo-se a fuzificação de cada variável topográfica como exemplificado nas Figuras 4 e 5.

Por fim, foram identificadas as funções de pertinência necessárias para caracterizar cada uma das classes de relevo, produzindo-se no final onze classes de formas de relevo: topo, vertente superior, vertente média soalheira convexa, vertente média úmbria convexa, vertente média soalheira linear, vertente média úmbria linear, vertente média soalheira côncava, vertente média úmbria côncava, vertente inferior soalheira, vertente inferior úmbria, e sopé.

Cada classe de relevo é caracterizada por 2 ou mais primitivas. Por exemplo, a classe “topo de vertente” é definida pela soma ponderada da primitiva que estabelece o grau de associação a uma superfície relativamente plana e a uma superfície com uma área de drenagem relativamente baixa, *i.e.* $[MF(\text{topo}) = 0,75MF(\text{SLPSrf}) + 0,25 MF(\text{UPSAmI})]$. Uma das grandes vantagens da aplicação da lógica difusa é poder não só manipular o gradiente de transição entre as características centrais das classes, mas também poder combinar as primitivas conferindo

maior ou menor peso às mais ou menos importantes para a definição de uma classe de relevo, utilizando para isso operadores de união ou de intersecção.

Desta abordagem resultam assim 11 mapas de formas de relevo, um para cada classe, mostrando o grau de associação de cada píxel a determinada forma de relevo.

2.3 Comparação de mapas de formas de relevo

De forma a poder comparar se existem diferenças significativas na aplicação de um método mais complexo de classificação de formas de relevo, como seja o da aplicação de lógica difusa, foi efectuada uma classificação discreta, aplicando os mesmo limiares topográficos utilizados para a classificação difusa de formas de relevo.

de Gruitjer (1997) defende que a desfuzificação de classes difusas de forma a produzir classes discretas é baseada em informação mais rica de variação contínua das variáveis, e portanto, as classes retêm o potencial do modelo difusa. Assim, procedeu-se à desfuzificação das 11 classes de formas de relevo, para produzir um único mapa, utilizando o método dos máximos, *i.e.* cada píxel pertence à classe de forma de relevo à qual apresenta maior grau de associação. Este método garante que todos os píxeis sejam classificados numa das classes.

Tendo obtido os dois mapas de classes de relevo desenvolvidos pelos dois métodos, é necessário sobrepô-los, analisando as diferenças entre eles, *i.e.* avaliando a mudança de classe de relevo que possa ocorrer com a aplicação de um ou outro método.

3. Resultados

As funções de pertinência, tais como as exemplificadas nas Figuras 4 e 5, correspondem à fuzificação de primitivas, e podem ser cartografadas. Em baixo apresentam-se alguns exemplos que mostram o grau de associação de cada píxel a uma determinada característica topográfica. Os mapas das Figuras 6 e 7 correspondem à cartografia das funções apresentadas na Figura 4, e os mapas das Figuras 8 e 9 correspondem à cartografia das funções apresentadas na Figura 5. As Figuras 10 e 11 mostram a variação espacial do grau de associação a superfícies relativamente secas (vertente soalheira) e relativamente húmidas (vertente úmbria), respectivamente, derivadas da função de pertinência da radiação solar potencial.

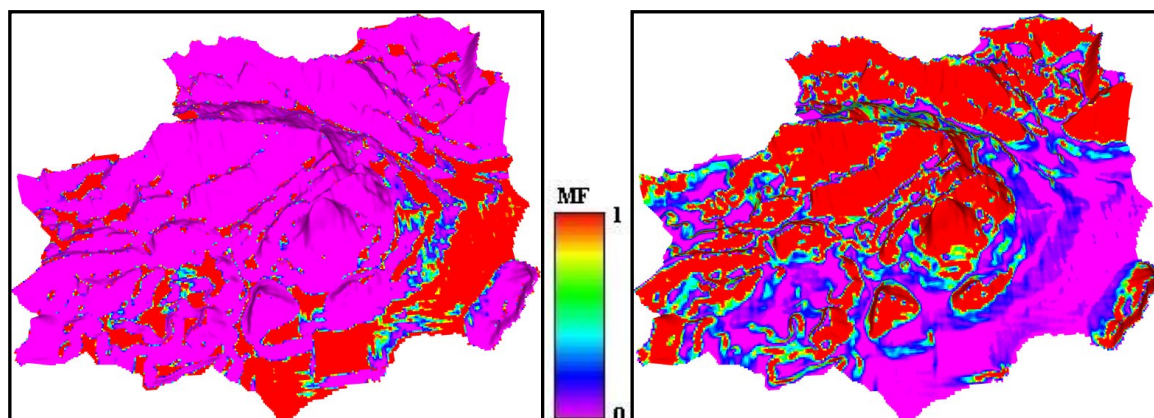


Figura 6 – Variação espacial do grau de associação a uma superfície relativamente plana

Figura 7 – Variação espacial do grau de associação a uma superfície bastante inclinada

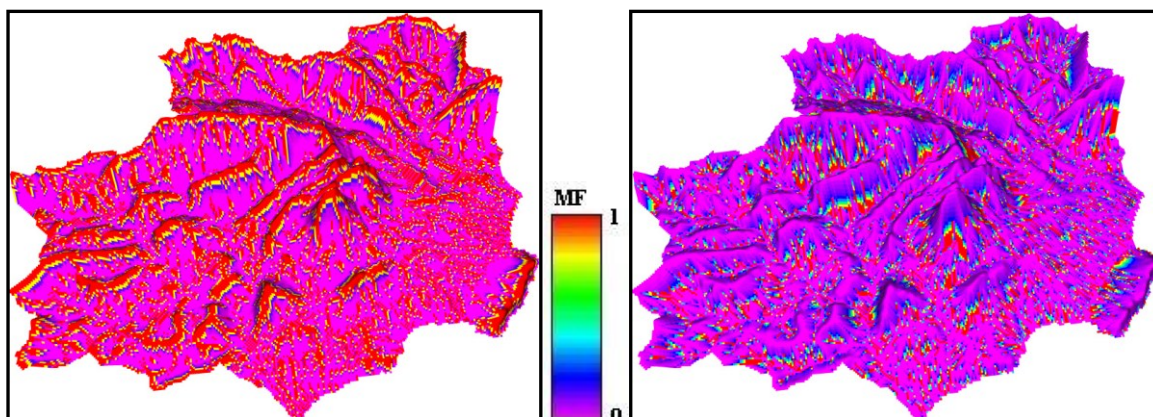


Figura 8 – Variação espacial do grau de associação a uma superfície com área de drenagem relativamente baixa

Figura 9 – Variação espacial do grau de associação a uma superfície com área de drenagem relativamente elevada

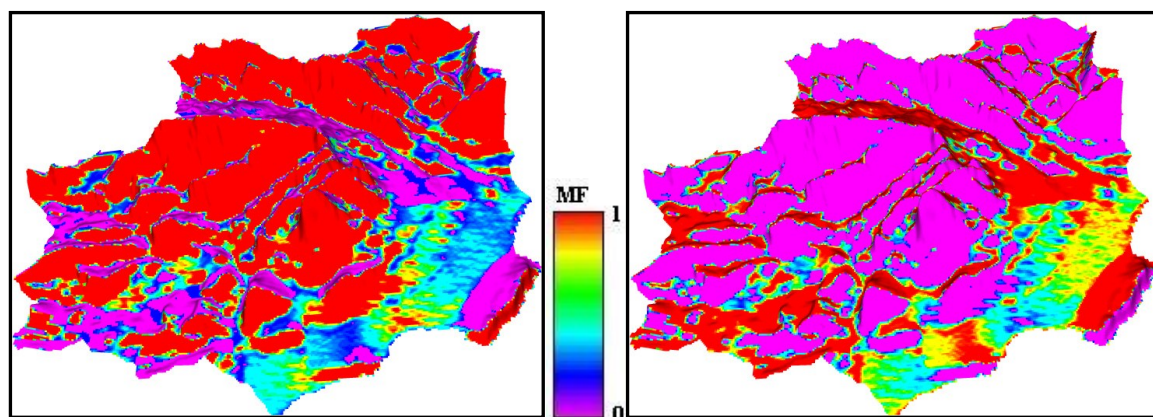
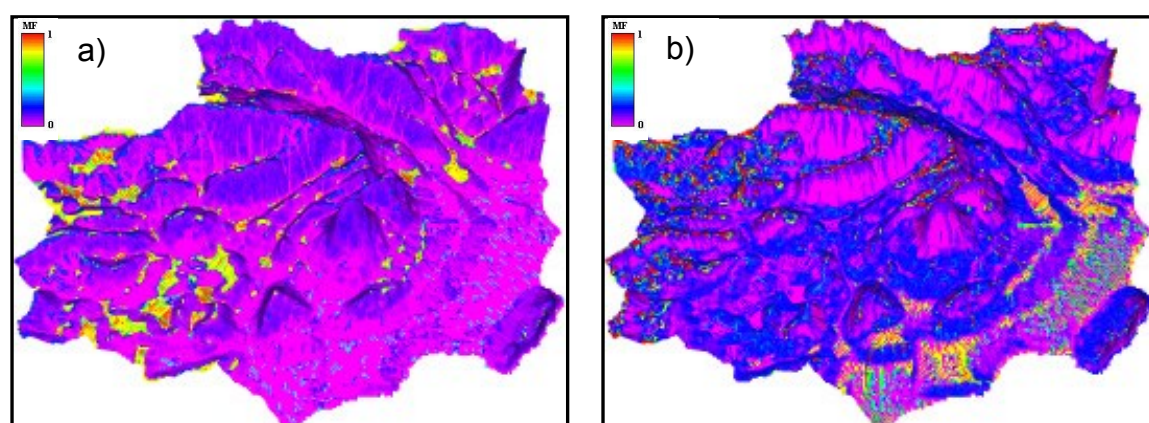


Figura 10 – Variação espacial do grau de associação a uma superfície relativamente seca

Figura 11 – Variação espacial do grau de associação a uma superfície relativamente húmida

A combinação das diferentes primitivas necessárias para a caracterização de cada classe de relevo, tal como o exemplo dado na secção 2.2 para a classe de topo de vertente, sintetiza o grau de associação de cada píxel a cada forma de relevo. A Figura 12 em baixo mostra a variação espacial do grau de associação de algumas das 11 formas de relevo identificadas na Marina Baixa.



(Figura continua na pág. seguinte)

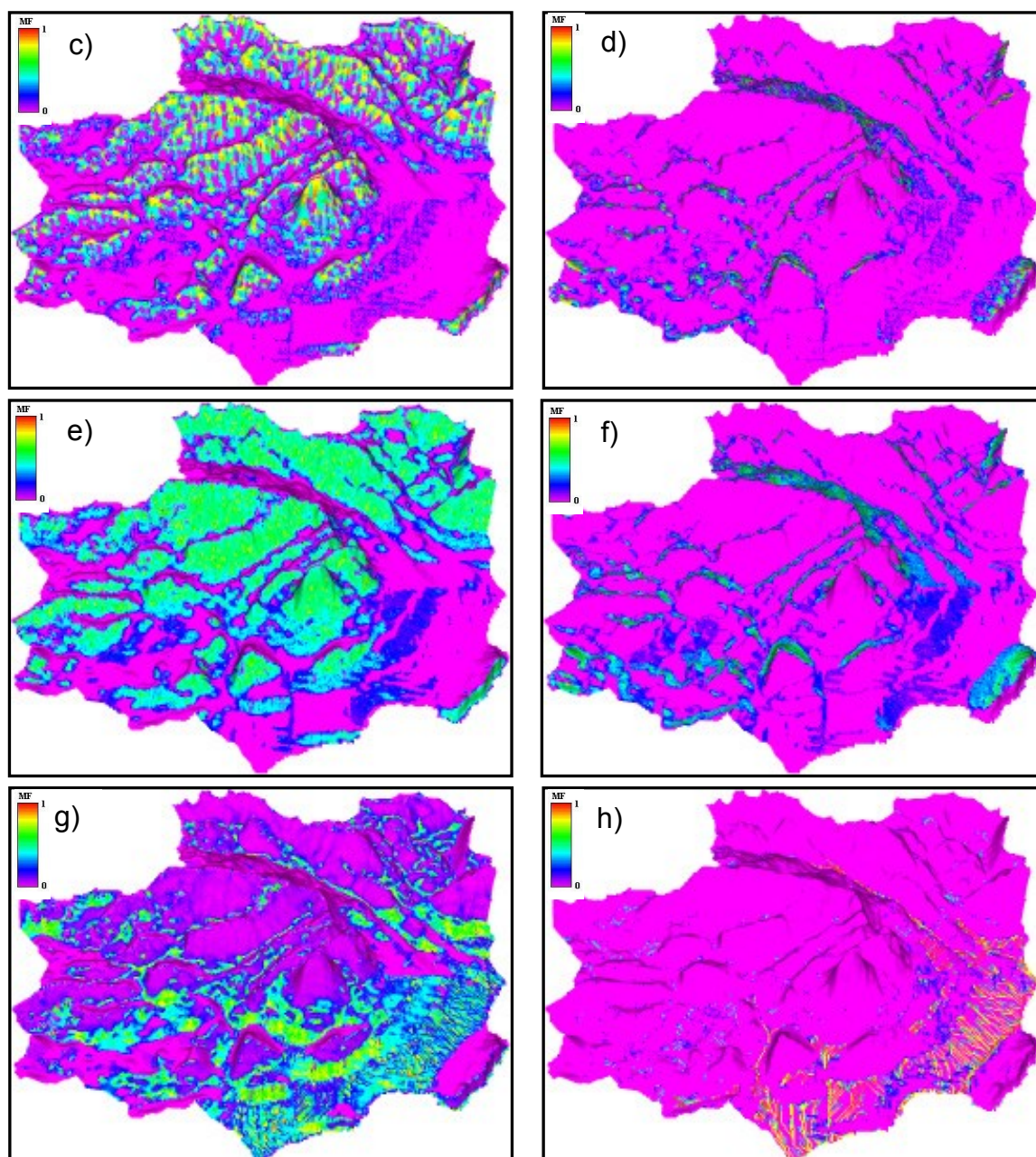


Figura 12 – Variação do grau de associação a cada forma de relevo: a) topo, b) vertente superior, c) vertente média soalheira convexa, d) vertente média úmbria convexa, e) vertente média soalheira linear, f) vertente média úmbria linear, g) vertente inferior soalheira, h) sopé.

Uma análise preliminar da desfuzificação das 11 classes de relevo, comparada com os resultados obtidos pelo método discreto, mostra claramente que uma parte dos píxeis classificados como pertencentes ao sopé da vertente no método discreto passaram a ser classificados como sendo de vertente superior. Uma análise detalhada revela que a mudança de classe se deve ao facto de aparecerem píxeis convexos longitudinal e transversalmente, que são características essenciais das vertentes superiores. Contudo, dada a sua posição topográfica,

tratam-se de píxeis de sopé. Assim, julgou-se apropriado subdividir o sopé em sopé de dissipação (píxeis convexos em ambas as direcções) e sopé de acumulação (píxeis côncavos em ambas as direcções). Assim, apresenta-se a desfuzificação do mapa final com 12 classes de formas de relevo (Figura 13).

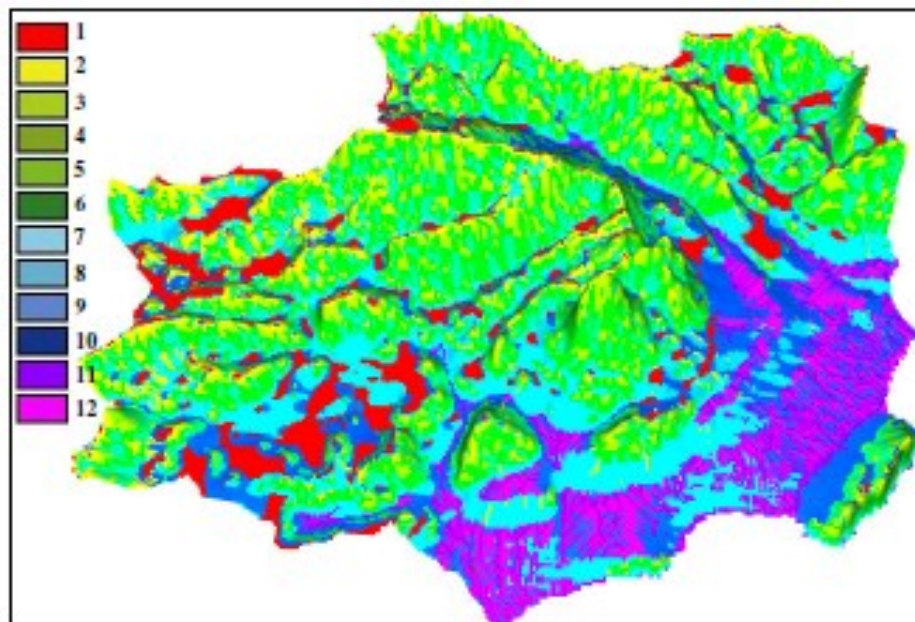


Figura 13 – Desfuzificação da classificação difusa de formas de relevo na Marina Baixa: 1) topo, 2) vertente superior, 3) vertente média soalheira convexa, 4) vertente média úmbria convexa, 5) vertente média soalheira linear, 6) vertente média úmbria linear, 7) vertente média soalheira côncava, 8) vertente média úmbria côncava, 9) vertente inferior soalheira, 10) vertente inferior úmbria, 11) sopé de acumulação e 12) sopé de dissipação.

A comparação dos resultados obtidos pela classificação difusa com uma classificação discreta foi efectuada por sobreposição de mapas, de onde se obtem um mapa que mostra os píxeis que mudaram de classe e aqueles que se mantiveram nas mesmas classes (Figura 14).

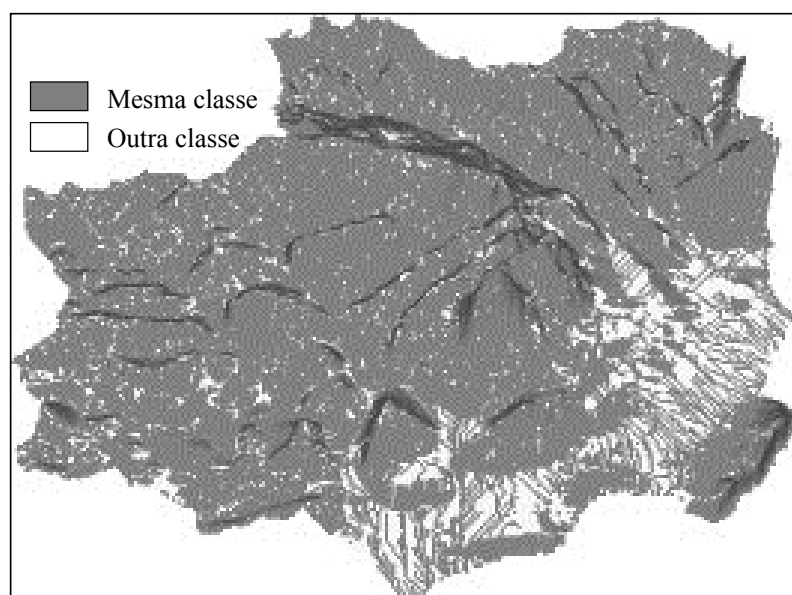


Figura 14 – Posição dos pixies que pertencem a classes de forma de relevo diferentes conforme método de classificação

4. Discussão

É notório que áreas que tenham um grau de associação elevado a uma determinada primitiva derivada de uma característica topográfica, apresentam um grau de associação relativamente baixo à primitiva com características opostas (Figuras 6 a 9, em posição adjacente). Assim, por exemplo, áreas que tenham uma área de drenagem relativamente baixa apresentam um elevado grau de associação com a primitiva cartografada na Figura 8, e um baixo grau de associação com a primitiva cartografada na Figura 9. Porém, os mapas não são simétricos pois as funções, tal como pode ser visto na Figura 5, não são lineares e a transição entre a característica central da classe e o universo de valores de variação possíveis de uma primitiva pode ser mais ou menos gradual ou abrupta, de acordo com os parâmetros da função trapezóide, que por sua vez são estabelecidos com base em critérios hidrológicos e pedológicos.

É também importante referir que o grau de associação máximo às diferentes formas de relevo (Figura 12) é inferior ao grau de associação máximo às diferentes primitivas (Figuras 6 a 11). Isto deve-se ao facto de o grau de associação das formas de relevo serem o resultado da união ou intersecção ponderada de primitivas, o que tende a produzir um grau de associação máximo de valores inferiores. Apesar dos valores do grau de associação às formas de relevo não serem tão altas quanto os das primitivas, isto só seria problemático para a desfuzificação se se utilizasse um método que impusesse valores mínimos de grau de associação para os píxeis poderem ser classificados como pertencentes a certas classes. Nestes casos seria possível que houvesse píxeis que não fossem atribuídos a qualquer classe se tivessem características próximas de várias classes, obtendo assim graus de associação relativamente baixo em todas elas. Contudo, a utilização do método dos máximos implica que todos os píxeis sejam classificados, mesmo que o seu grau de associação mais alto a uma das classes seja relativamente baixo.

A análise detalhada da desfuzificação da classificação difusa mostra que a altitude dos diferentes tipos de vertentes médias varia conforme se trata de uma vertente soalheira ou úmbria. Desta forma, na vertente úmbria as classes de vertentes médias estão geralmente a altitudes superiores do que nas vertentes soalheiras porque as vertentes viradas a norte são geralmente menos inclinadas. De acordo com Kennedy (1997) as vertentes viradas a sul (no hemisfério norte) tendem a apresentar declives superiores porque existe uma maior flutuação do regime hídrico, o que propicia erosão mais elevada, o que por sua vez origina assimetria de vales causada pela orientação das vertentes.

A comparação dos dois métodos de classificação (discreto e difuso) mostra que cerca de 20% da área da Marina Baixa é classificada em classes diferentes dependente do método de classificação. Assim, as áreas de topo, vertente superior, vertente média soalheira convexa, vertentes médias côncavas, vertentes inferiores e sopé sofreram uma diminuição, enquanto que as restantes classes aumentaram de área. A classe de vertente superior é aquela que perde

maior área da classificação discreta para a difusa (2,5%), sendo que nesta última esses píxeis são atribuídos às classes de vertentes médias e inferiores.

Assim, apesar do grau de sobreposição entre os mapas produzidos com os dois métodos ser relativamente elevado, houve três classes que sofreram bastantes alterações: vertente superior, vertente inferior úmbria e sopé. Qualquer uma destas classes passou a apresentar manchas menos compactas.

A classificação difusa restringiu as áreas classificadas como vertentes superiores e sopés e, considerando as novas classes aos quais aqueles píxeis foram atribuídos na classificação difusa, conclui-se que esta última teve uma capacidade superior de classificar as zonas baixas das vertentes.

5. Conclusão

As classificações baseadas na utilização de lógica difusa são, à partida, superiores às que classificações discretas tradicionais baseadas na lógica booleana porque as primeiras permitem formalizar o nosso conhecimento acerca da variação dos solos com a topografia do terreno pela manipulação dos parâmetros das funções de pertinência. Assim, apesar do método que utiliza a lógica difusa ser mais complexo, e implicar um maior número de tomada de decisões subjectivas, tem a vantagem de reflectir mais aproximadamente o nosso conhecimento pedo-geomorfológico, formalizando matematicamente uma linguagem por vezes imprecisa, como é o caso de um topo de vertente que é “relativamente” plano.

A análise comparativa dos mapas resultantes da aplicação dos métodos discreto e difuso mostrou que a classificação baseada na aplicação de lógica difusa é simultaneamente a que melhor separa as classes de formas de relevo e consegue detectar e incorporar mais variabilidade topográfica. Assim, a lógica difusa tem um enorme potencial para melhorar a qualidade e a precisão da cartografia tradicional de solos (mapas produzidos utilizando uma lógica booleana) permitindo uma parametrização mais detalhada do modelo fisiográfico que lhe serve de base.

6. Bibliografia

Brath A, Montanari A (2000) The effects of the spatial variability of soil infiltration capacity in distributed flood modelling. *Hydrological Processes*, 4: 2779–2794.

Brunner A C, Park S J, Ruecker G R, Dikau R, Vlek P L G (2004) Catenary soil development influencing erosion susceptibility along a hillslope in Uganda. *Catena*, 58: 1–22.

de Gruitjer J J, Walvoort D J J, van Gaans, P F M (1997) Continuous soil maps – a fuzzy set approach to bridge the gap between aggregation levels of process and distribution models. *Geoderma*, 77: 169-195.

Irvin B J, Ventura S J, Slater B K (1997) Fuzzy and isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant Valley, Wisconsin. *Geoderma*, 77: 137-154.

Kennedy B A (1997) The trouble with valleys. In Stoddart D R (ed.) *Processes and Form in Geomorphology*. Routledge, London: 60-73.

Lopes da Fonseca, I. (2005) Modelling Soil Properties at the Landscape Scale in a Desertification Context. Tese de doutoramento, King's College London, University of London, London.

MacMillan R A, Pettapiece W W, Nolan S C, Goddard T W (2000) A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems*, 113: 81-109.

McBratney A B, Mendonça Santos M L, Minasny B (2003) On digital soil mapping. *Geoderma*, 117: 3-52.

McBratney A B, Odeh I O A (1997) Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. *Geoderma*, 77: 85-113.

Mulla D J, McBratney A B (2000) Soil spatial variability. In Sumner M E (ed.) *Handbook of Soil Science*. CRC Press, Boca Raton: A 321-352.

Odeh I O A, McBratney A B, Chittleborough D J (1992) Fuzzy c-means and kriging for mapping soil as a continuous system. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 1848-1854.

Ruhe R V, Walker P H (1968) Hillslope models and soil formation. I - Open systems. *Transactions of the 9th Congress of the International Soil Science Society*. International Soil Science Society, Adelaide: 551-560.

Vertessy R, Elsenbeer H, Bessard Y, Lack A (2000) Storm runoff generation at La Cuenca. In Grayson R, Blöschl G (eds) *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling*. Cambridge University Press, Cambridge: 247-271.

Western A, Grayson R (2000) Soil moisture and runoff processes at Tarrawarra. In Grayson R, Blöschl G (eds) *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling*. Cambridge University Press, Cambridge: 209-246.

Zhu A-X, Band L, Vertessy R, Dutton B (1997) Derivation of soil properties using a land inference model (SoLIM). *Soil Science Society of America Journal*, 61: 523-533.