



G

TRUNFOS DE UMA  
**EOGRAFIA ACTIVA**

DESENVOLVIMENTO LOCAL,  
AMBIENTE,  
ORDENAMENTO  
E TECNOLOGIA

**Norberto Santos**  
**Lúcio Cunha**

COORDENAÇÃO

Nuno Neves<sup>1,2</sup>, Nuno Guiomar<sup>1,3</sup>, Marco Freire<sup>1,2</sup>, Lénia Duarte<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Universidade de Évora*

<sup>2</sup> *e-GEO – Centro de Estudos de Geografia e Planeamento Regional*

<sup>3</sup> *ICAAM – Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas*

## NOVA MÉTRICA FOCAL DO ACIDENTADO DO TERRENO: AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE ESCALA E DE CONTEXTO

### 1. INTRODUÇÃO

Embora exista pouco consenso acerca da forma de avaliação quantitativa mais adequada para a variação do terreno é largamente aceite a sua utilidade e relevância no vasto número de disciplinas que têm na caracterização do relevo uma base fundamental.

Segundo Hobson (1972) a rugosidade do terreno pode ser determinada a partir da variação do declive e das orientações de encosta. Os primeiros métodos computacionais de quantificação do acidentado do terreno centravam-se na avaliação da variação do declive ou em métodos indirectos como a avaliação do comprimento total das curvas de nível numa dada área, tal como é o caso do índice LSRI (Land Surface Ruggedness Index) desenvolvido por Beasom *et al.* (1983), e mais recentemente o índice TRI (Terrain Ruggedness Index) proposto por Riley *et al.* (1999), que quantifica a variação focal total da cota numa dada vizinhança matricial.

A maioria dos índices usados baseia-se no declive, nas suas diferentes formulações, bem como em medidas indirectas que traduzem o acidentado do terreno como estando directamente relacionado com a variação de cotas numa dada área em análise. Dos diferentes métodos existentes consideramos pertinente a referência a três, que traduzem avanços particularmente relevantes na avaliação quantitativa do relevo:

(a) LSRI (Land Surface Ruggedness Index) – método que quantifica o acidentado do terreno pela densidade de curvas de nível numa determinada área (Beasom *et al.*, 1983). Esta medida indirecta concebida para operar no quadro de uma aproximação com base num modelo vectorial de dados, afigura-se marcadamente dependente do declive, não permitindo a classificação adequada do acidentado ou rugosidade em contexto de variações notáveis de orientação em áreas com valores baixos de declive.

(b) TRI (Terrain Ruggedness Index) – quantifica o acidentado do terreno através da variação focal da altitude (Riley *et al.*, 1999), ou seja, a soma dos valores absolutos das diferenças de altitude entre uma célula central e as suas oito células vizinhas. Esta métrica apresenta igualmente limitações, pela incapacidade de avaliação do acidentado em terrenos pouco declivosos, dada a grande dependência em relação ao factor declive.

(c) VRM (Vector Ruggedness Measure) – caracteriza-se por uma quantificação da variabilidade de vectores caracterizadores do declive e da orientação, numa aproximação focal de vizinhança matricial variável (Sappington *et al.*, 2007). Usa a dispersão tridimensional de

vectores normais à superfície do terreno, dando uma melhor imagem da heterogeneidade do terreno que os índices baseados apenas no declive ou na altitude.

Os dois primeiros métodos referidos têm a limitação importante de não conseguirem diferenciar áreas que, tendo declives semelhantes, tenham gradientes de variação com consistências diferentes (Sappington *et al.*, 2007), uma vez que não é considerada a orientação das encostas e estão fortemente influenciados pelo declive. A fórmula do índice VRM resulta do cálculo de uma métrica focal baseada na operação de vizinhança SUM aplicada à decomposição dos vectores  $x$ ,  $y$  e  $z$  de cada célula na vizinhança definida. Sendo  $x$ ,  $y$  as componentes da orientação e  $z$  do declive, o valor de rugosidade  $R$  resulta da expressão:

$$R = 1 - \frac{|r|}{n}$$

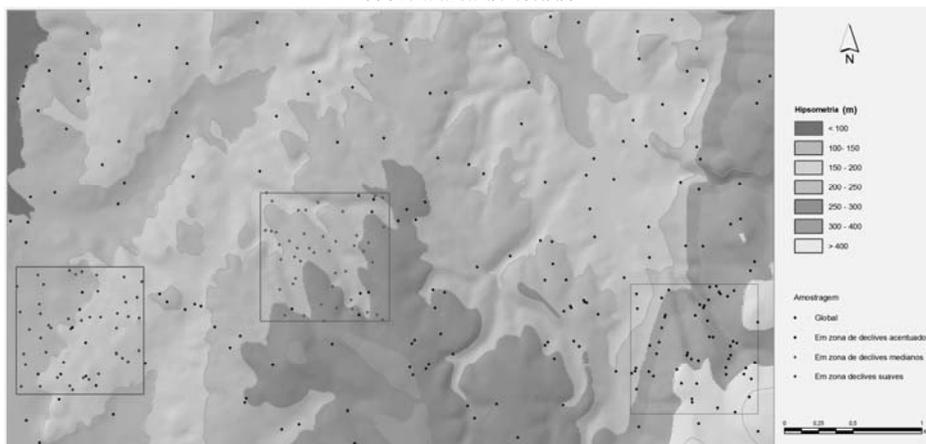
em que:

$$r = \sqrt{(\sum x)^2 + (\sum y)^2 + (\sum z)^2}$$

e  $n$  o número de células na vizinhança considerada.

As principais limitações de aproximação do método VRM, cuja formulação é elegante e robusta, prendem-se com o facto de efectuar uma caracterização do terreno baseada na soma dos vectores independentemente da sua posição relativamente à célula em processamento. Como veremos adiante este facto concorre para um menor rigor na distinção de situações de ruptura de declive ou orientação de encostas conforme se processem células ortogonais ou diagonais.

Figura 1 - Classes hipsométricas e distribuição dos pontos de amostragem sobre a área de estudo



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

Como parcela de estudo foi seleccionada a área de 18 Km<sup>2</sup> representada na Figura 1, localizada no litoral centro de Portugal (39° 37' N, 08° 47' W), com uma amplitude altimétrica de 411 m, variando entre as cotas 81 m e 492 m.

673

### 2.2. Desenvolvimento conceptual: criação de uma nova métrica focal

O cálculo de declives e orientações de encosta tem recebido a atenção de inúmeros autores e são conhecidos diversos métodos, desenvolvidos com objectivos e em contextos aplicacionais diversos. Dos diversos métodos conhecidos o mais utilizado é o método de Horn (1981) aplicado por diversos autores (Skidmore, 1989; Burrough & McDonell, 1998).

Começamos pelas expressões de cálculo de declive e orientações de encosta mais frequentemente utilizadas. O declive como métrica focal é usualmente descrito pela fórmula:

$$Slope = a \tan\left(\frac{rise}{run}\right)$$

que pode surgir com uma formulação diferente, considerando dz a altura e dx e dy as componentes da distância ou comprimento entre o centro de cada par de células:

$$Slope = a \tan\left(\frac{dz}{\sqrt{(dx)^2 + (dy)^2}}\right)$$

O algoritmo de cálculo do declive implementado adapta um plano aos valores de cota numa vizinhança 3x3 da cada célula em processamento. Este método, desenvolvido por Horn (1981) e também conhecido pelo «método da diferença finita de terceira ordem». Assim, a expressão para calcular o declive num modelo digital de elevações é:

$$Slope = a \tan \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2}$$

A orientação de encostas, numa aproximação semelhante à do cálculo do declive segundo o método de Horn (1981), adapta igualmente um plano a uma vizinhança 3x3, sendo o cálculo dos valores descrito pela expressão:

$$Aspect = a \tan\left(\frac{-(dz/dy)}{dz/dx}\right)$$

Para efeitos de cálculo do acidentado do terreno é necessário considerar concomitantemente a variação do declive e a variação das orientações de encosta numa vizinhança focal 3x3.

A variação das orientações, considerando os valores em que surge expressa essa métrica (valores contínuos entre 0° e 360°) não pode ser calculada numa aplicação directa de qualquer função de análise espacial, devido à própria natureza dos valores em que surge expressa, pois valores tão quantitativamente diferentes (como 0° e 360°) descrevem situações de facto idênticas, o que naturalmente compromete a validade da análise.

Uma forma simples de ultrapassar essa situação é efectuar o cálculo da variação das orientações pela sua decomposição em duas parcelas: o cálculo da variação do cosseno da orientação adicionado do cálculo do seno da orientação. O seno e o cosseno da orientação de encostas são descritos pelas expressões:

$$\sin a = \sin Aspect = \sin \left( a \tan \left( \frac{-(dz/dy)}{dz/dx} \right) \right) \quad e \quad \cos a = \cos Aspect = \cos \left( a \tan \left( \frac{-(dz/dy)}{dz/dx} \right) \right)$$

A utilização de uma medida da variação do seno e cosseno para avaliar a variação de orientações não pode contudo ser utilizada sem que tenha sido aplicada uma transformação dos seus valores. Como a variação do seno e do cosseno não é linear, variações angulares semelhantes podem resultar, aquando do cálculo do seu declive em valores diferentes, comprometendo a aplicação do método.

Assim os valores de seno e cosseno calculados foram objecto de uma transformação visando obter uma medida de variação linear conforme a variação das orientações de encosta. A transformação do seno (sa) e do cosseno (ca) da orientação de encostas é resultado das seguintes fórmulas:

$$sa = \sin a \left( \frac{\sin a}{|\sin a| + |\cos a|} \right) \quad e \quad ca = \cos a \left( \frac{\cos a}{|\sin a| + |\cos a|} \right)$$

A variação das transformações de seno ( $\beta$ ) e cosseno ( $\delta$ ), aplicando o mesmo método de cálculo empregue para os declives viria:

$$\beta = a \tan \sqrt{\left( \frac{dz(sa)}{dx(sa)} \right)^2 + \left( \frac{dz(sa)}{dy(sa)} \right)^2} \quad e \quad \delta = a \tan \sqrt{\left( \frac{dz(ca)}{dx(ca)} \right)^2 + \left( \frac{dz(ca)}{dy(ca)} \right)^2}$$

Da mesma forma podemos calcular a variação do declive considerando a variação da transformada do seno ou do cosseno. Este procedimento seria aparentemente desnecessário pois os declives variam entre 0° e 90°, pelo que a sua variação seria facilmente calculada através de um cálculo do declive do declive. No entanto, na composição de uma métrica focal do acidentado do terreno é fundamental que os valores finais resultantes possam expressar uma valoração equivalente das diferentes componentes da fórmula.

Sendo a variação da orientação de encostas expressa pela soma da variação do seno com a variação do cosseno, e considerando que os valores de seno e cosseno variam entre -1 e 1, facilmente se conclui que os valores resultantes do cálculo do declive do declive iriam considerar diferenças potencialmente muito superiores, o que afectaria profundamente o rigor das análises a efectuar. Assim visando normalizar o processo de cálculo da variação do declive

este resulta do cálculo da variação do seno do declive. O seno do declive é expresso pela fórmula:

$$\sin s = \sin Slope = \sin \left( a \tan \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} \right)$$

675

Efectuando uma transformação similar à efectuada anteriormente para o seno da orientação de encostas, visando obter uma medida de variação linear conforme a variação do declive. A transformação do seno (ss) do declive vem:

$$ss = \sin s \left( \frac{\sin a}{|\sin s| + |\cos s|} \right)$$

Assim, a variação da transformada do seno do declive ( $\alpha$ ) vem:

$$\alpha = a \tan \sqrt{\left(\frac{dz(ss)}{dx(ss)}\right)^2 + \left(\frac{dz(ss)}{dy(ss)}\right)^2}$$

Na criação de uma métrica focal de acidentado do terreno, considerando uma paridade de importância entre a variação das orientações e a variação do declive, uma fórmula integrando estas duas variáveis viria:

$$A = \alpha + (\beta + \delta)$$

em que A é o acidentado do terreno.

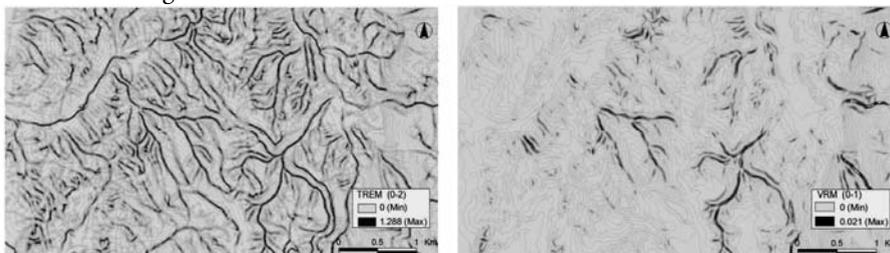
No entanto, a utilização da função slope para calcular a variação máxima implica que sejam definidos parâmetros de normalização, pois como se trata de um cálculo aplicado a valores que não os de altitude mas sim de transformações de seno e cosseno, que variam entre -1 e 1 em qualquer das situações, rapidamente se conclui que uma variação de tamanho da célula iria afectar o resultado final, pois a função slope considera o tamanho da célula conforme descrito anteriormente. Assim a variação em altura (dz) deve ser afectada pelo tamanho da célula (C) como um factor multiplicador.

Da mesma forma considerando que os valores das transformações do seno do declive irão variar entre 0 e 1, então este cálculo deverá ser multiplicado por 2 para atingir o valor de variação equivalente ao da orientação (entre -1 e 1).

A utilização do tamanho da célula como factor multiplicador permite que os valores resultantes sejam normalizados podendo atingir um valor máximo de aproximadamente 63,435° (atan 2). Desta forma é evidente que se introduzirmos este valor como divisor na expressão geral, os valores finais surgirão normalizados entre 0 e 1. Considerando que se trata de uma expressão com duas parcelas fundamentais e podendo ambas variar independentemente entre 0 e 1, o valor final da nossa métrica focal de acidentado do terreno variará entre 0 e 2. A fórmula final assume a seguinte expressão:

Na Figura 2 apresenta-se a representação cartográfica dos valores obtidos para os índices TREM e VRM, relativos à área de estudo segundo uma escala contínua entre 0 e 2 para o TREM e entre 0 e 1 para o VRM. No caso do índice TREM, notam-se os valores indicadores de um maior acidentado do terreno, distribuídos pelas zonas em que se verificam quebras de continuidade quer do gradiente de declive como da orientação das encostas.

Figura 2 – Gradiente dos valores dos índices TREM e VRM



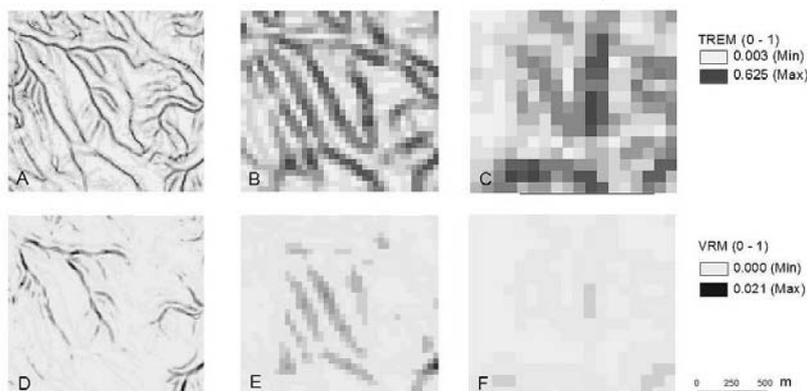
Visando efectuar uma avaliação de resultados, foram gerados quatro grupos de pontos de amostragem com distribuição aleatória na área de estudo, distribuídos da seguinte forma: um grupo de 180 pontos que cobre a totalidade da área e três grupos de 45 pontos cada, distribuídos segundo três zonas de diferentes magnitudes de declive predominante (Figura 1). Nos pontos de amostragem foram recolhidos os dados referentes aos índices TREM e VRM e ainda do declive de modo a avaliar o seu comportamento em diferentes escalas de análise e contextos diversos.

### 3.1. Efeito de escala

A «escala» de análise, traduzida pela resolução matricial, constitui um elemento fundamental na análise de terreno, conquanto permite uma alteração de perspectiva em que a avaliação das variações do resultado da aplicação de um método pode constituir um elemento de caracterização geral importante. A avaliação efectuada permitiu aquilatar acerca da importância da variação de resolução enquanto elemento chave em processos de avaliação do acidentado do terreno. A Figura 3 ilustra o efeito de escala ou de detalhe da avaliação, traduzido pela resolução da base matricial para os índices TREM e VRM.

É possível observar uma mais acentuada perda de definição ou esbatimento dos valores por parte do índice VRM, o que decorre da sua estrutura interna orientada para a soma de vectores, fortemente ponderada pelo efeito do declive, o que em áreas pouco acidentadas resultantes de uma homogeneização do espaço, resulta numa menor capacidade para mensurar a variabilidade do terreno.

Figura 3 – Índices TREM (A, B, C) e VRM (D, E, F) numa escala comum de valores normalizados (0 – 1) para diferentes escalas de análise (resolução das células de análise: A e D = 10m; B e E = 50m; C e F = 100m)



O índice TREM demonstra maior robustez, embora perca igualmente alguma definição pois a sua estrutura interna é independente do declive, permitindo, no entanto, identificar as variações de declive (rupturas) e as variações de orientação de encostas de forma mais consistente.

### 3.2. Avaliação de contexto

Inicialmente procurou-se testar o comportamento dos dois índices face a variações de contexto numa perspectiva de variação de vizinhança focal. No entanto em virtude de o índice TREM ser essencialmente uma métrica focal baseada no declive segundo o método de Horn (1981), assente em vizinhanças 3x3, optou-se por efectuar uma avaliação de comportamento em contextos de análise ou cenários de terreno diversificados, procurando avaliar as diferenças de comportamento dos dois índices para diferentes tipos de terreno (Tabela 1).

Tabela 1 – Coeficiente  $\rho$  de Spearman para a relação entre os índices TREM e VRM e o declive de acordo com o contexto e a escala de análise

	n	TREM vs Declive			VRM vs Declive		
		( $\rho$ )	95% CI	<i>p</i> -value	( $\rho$ )	95% CI	<i>p</i> -value
<b>AMOSTRAGEM</b>							
Global	180	- 0.40	-0.52 a - 0.27	< 0.0001	0.21	0.07 a 0.35	0.0038
Declives suaves	45	- 0.46	-0.67 a - 0.20	0.0013	0.11	-0.19 a 0.39	0.4754
Declives moderados	45	-0.56	-0.73 a - 0.32	< 0.0001	-0.17	-0.44 a 0.13	0.2781
Declives acentuados	45	-0.66	-0.80 a - 0.45	< 0.0001	-0.06	-0.35 a 0.23	0.6748

RESOLUÇÃO (M)							
10	180	- 0.40	-0.52 a - 0.27	< 0.0001	0.21	0.07 a 0.35	0.0038
50	180	- 0.30	-0.45 a - 0.16	< 0.0001	0.21	0.07 a 0.35	0.0050
100	180	-0.18	-0.32 a - 0.03	0.0182	0.20	0.05 a 0.34	0.0104

A correlação entre o declive e o VRM apenas é significativa para a amostragem global (correlação fracamente positiva de 0.21) para um intervalo de confiança de 95%, nas outras amostragens parcelares parece não haver correlação entre o VRM e o declive com valores de p-value superiores a 0.005 em todos os cenários considerados.

A correlação negativa entre o declive e o TREM, apesar de aparentemente surpreendente, vem na verdade enfatizar a utilidade deste tipo de aproximações não apenas enquanto métricas focais mas também como instrumentos de caracterização mais globais ou de contexto. A correlação negativa entre o declive e o índice TREM (apresenta valores mais elevados em áreas de declive baixo) expressa claramente as características do terreno da área de estudo, com cumeadas e vales relativamente aplanados. Desta forma os valores do índice são resultado das variações marcantes de orientação de encostas. A comparação dos índices TREM e VRM obviamente não coloca em causa a validade de qualquer das duas aproximações. Tratam-se de métodos diferentes com vantagens e desvantagens conforme os objectivos de aplicação.

#### 4. CONCLUSÕES

A definição de métricas de avaliação do terreno desempenha um papel fundamental na compreensão geral dos sistemas e cenários territoriais, contribuindo para o estabelecimento de cenários de caracterização do espaço passíveis de aplicação em diversos contextos de sistematização e interpretação da paisagem.

O índice VRM caracteriza-se por uma quantificação da variabilidade de vectores caracterizadores do declive e da orientação, numa aproximação focal de vizinhança matricial variável. As principais limitações de aproximação deste método prendem-se com o facto de efectuar uma caracterização do terreno baseada na soma dos vectores independentemente da sua posição relativamente à célula em processamento. Este facto concorre para um menor rigor na distinção de situações de ruptura de declive ou orientação de encostas conforme se processem células ortogonais ou diagonais. Por outro lado o índice VRM não integra a variação interna do declive, apenas expressa indirectamente a forma da anulação de ângulos opostos na avaliação da variação das orientações de encosta.

No índice TREM são consideradas as variações tanto de declive como de orientação, revelando-se mais adequado para o cálculo do acidentado do terreno em situações de relevos menos vigorosos. A avaliação efectuada permitiu aquilatar acerca da importância dos efeitos de escala e de contexto enquanto elementos chave em processos de avaliação do acidentado do terreno, sendo os resultados e considerações efectuadas aplicáveis a uma grande variedade de problemas de análise espacial e caracterização do espaço.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beasom, S. L., Wiggers, E. P. & Giordano, R. J. 1983, 'A technique for assessing land surface ruggedness', *The Journal of Wildlife Management*, vol. 47, pp. 1163-1166.
- Burrough, P. A. & McDonell, R. A. 1998, *Principles of geographical information systems: spatial information systems and geostatistics*, Oxford University Press, Oxford.
- Hobson, R. D. 1972, 'Surface roughness in topography: a quantitative approach', in *Spatial analysis in geomorphology*, ed. R. J. Chorley, Methuen & Co., London.
- Horn, B. K. P. 1981, 'Hill shading and the reflectance map', *Proceedings of IEEE*, vol. 69, no. 1, pp.14-47.
- Riley, S. J., Degloria, S. D. & Elliot, R. 1999, 'A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity', *Intermountain Journal of Sciences*, vol. 5, pp. 1-4.
- Sappington, J., Longshore, K. & Thompson, D. 2007, 'Quantifying landscape ruggedness for animal habitat analysis: A case study using bighorn sheep in the Mojave Desert', *The Journal of Wildlife Management*, vol. 71, no. 5, pp. 1419-1426.
- Skidmore, A. K. 1989, 'Comparison of techniques for calculating gradient and slope from a gridded digital elevation model', *International Journal of Geographic Information Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 323-334.

## 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.