

PROSPECÇÃO DE ENDOCARSO ATRAVÉS DUMA APLICAÇÃO DE SIG

VARGAS, H.¹, KULLBERG, J. C.¹, BRITO, M. G.¹.

Resumo

Os parâmetros que condicionam o desenvolvimento dum carso em profundidade - endocarso - são complexos e difíceis de avaliar devido, por um lado, à diversidade e variabilidade dos factores envolvidos referentes ao meio e, por outro, à dificuldade de quantificar a sua interacção e influência no desenvolvimento da carsificação.

*É apresentada uma metodologia em ambiente SIG que visa a prospecção de estruturas cársicas de sub-superfície. Pretende-se efectuar, duma forma sistemática, a integração do conjunto de parâmetros que controlam o desenvolvimento deste tipo de carsificação, de forma a testar interacções e classificar áreas com maior **aptidão para** ocorrência de estruturas.*

O estudo incidiu sobre uma área piloto a Oeste de Sesimbra, região onde são conhecidas várias dessas estruturas, com particular relevância para as grutas do Zambujal² e do Frade.

PALAVRAS-CHAVE: Endocarso, Prospecção, Automatização, Carta de aptidão.

INTRODUÇÃO

De forma abrangente, carsificação é definida como o conjunto de processos geológicos de alteração química e mecânica diferencial que, sob determinadas condições do meio, actuam sobre corpos rochosos solúveis, como os calcários, os dolomitos, o gesso e o sal.

Estes processos são mais eficazes quando actuam em formações calcárias espessas e fracturadas, e em climas dentro de determinados valores de temperatura e humidade; a alteração ocorrerá tanto à superfície como em profundidade resultando, deste último, a formação do designado endocarso.

Os processos naturais que levam ao seu desenvolvimento são complexos e difíceis de avaliar, essencialmente por duas razões: por um lado, a diversidade e a variabilidade dos factores envolvidos referentes ao meio e, por outro, a sua quantificação, mesmo que relativa, ou seja, a definição da importância da intervenção de cada um deles.

A motivação para o desenvolvimento de um modelo SIG com vista à prospecção de carso profundo reside na necessidade de compreender e sistematizar as interacções e a importância que os vários processos naturais assumem no desenvolvimento do endocarso.

Assim, foi desenvolvida uma aplicação em Avenue, para ArcView 3.0 a 3.2a que serviu para testar interacções e tentar estabelecer intervalos qualitativos, que explicam a influência de cada um dos factores no desenvolvimento da morfologia cársica, numa área a Oeste de Sesimbra, utilizada como área-piloto.

A aplicação SIG compreendeu o desenvolvimento de dois modelos de análise espacial: 1) modelo geométrico de fracturação que manipula os dados originais de forma a derivar e extrair os padrões espaciais de fracturação mais relevantes; 2) modelo de aptidão de endocarso, que integra, de forma ponderada, os vários factores e parâmetros

¹ Centro de Investigação em Geociências Aplicadas, Universidade Nova de Lisboa.

² Classificada como Sítio de Interesse Espeleológico pelo Decreto-Lei nº 140/79 de 21 de Março

derivados que preconizam as áreas de maior aptidão para o desenvolvimento de endocarso.

A separação entre factores independentes e dependentes da escala de trabalho deve-se entender da seguinte forma: os factores a considerar – independentes – têm significado quando os seus padrões são claramente individualizáveis e identificáveis na escala de trabalho.

DEFINIÇÃO DOS FACTORES QUE CONDICIONAM A FORMAÇÃO DE CARSO PROFUNDO

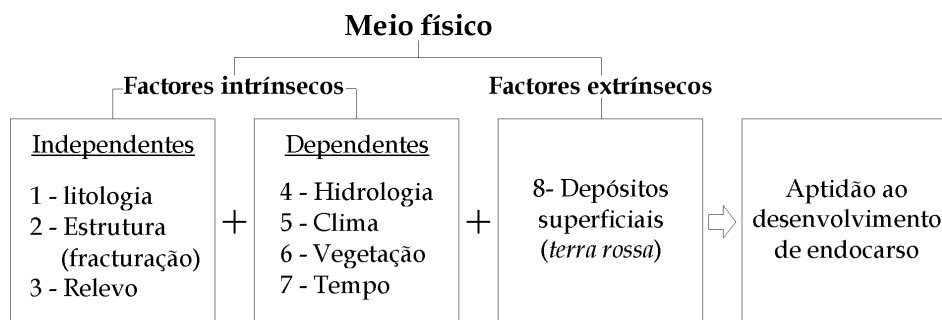
O desenvolvimento da morfologia cársica depende da interacção de pelo menos sete factores importantes, a saber: 1- litologia, 2 - estrutura, 3 - relevo, 4 - hidrologia, 5 - clima, 7 - vegetação e 8 - tempo [1]. D. C. FORD (1976) [2] efectua uma análise aprofundada sobre a importância destes factores tentando estabelecer limites ou *thresholds* não chegando a estabelecer intervalos quantitativos sobre a influência de cada um.

Para os objectivos propostos no trabalho outro parâmetro, designemo-lo por extrínseco, foi considerado: o da ocorrência de áreas de depósitos superficiais do tipo *terra rossa* (8). Ele constitui a expressão, à superfície, da actuação dos factores anteriormente enunciados, do meio físico (geológico/geomorfológico) e ambientais que sobre eles actuam, consideráveis como factores intrínsecos. Na realidade, a ocorrência daqueles depósitos constitui uma evidência de zonas principais de dissolução de carbonatos, actualmente parcial ou totalmente impermeabilizadas, mas anteriormente de nucleação da dissolução. Este parâmetro será, assim, integrável como parâmetro apenas enquanto for considerado para efeitos de prospecção.

METODOLOGIA

O fenómeno de carsificação pode ser descrito por um modelo conceptual que represente, por palavras ou diagramas, as suas características e os processos que controlam o seu desenvolvimento.

O modelo conceptual associado ao fenómeno de carsificação profunda pode ser representado pelo seguinte diagrama:



Foi desenvolvida uma metodologia permitiu, de uma forma sistemática, a integração do conjunto de parâmetros que controlam o desenvolvimento dos fenómenos de carsificação subterrânea, de forma a testar as suas interacções e permitir definir áreas com maior aptidão para a ocorrência de estruturas endocársicas.

O trabalho compreendeu três etapas distintas:

1. Definição de parâmetros e recolha de informação de carácter geológico e integração em formato digital;
2. Construção da base de dados e categorização da informação vectorial através de um índice que representa a aptidão dos parâmetros ao desenvolvimento de endocarso;
3. Desenvolvimento de modelo e aplicação para o mapeamento das zonas de maior potencial para a ocorrência de endocarso.

Em pormenor, a metodologia utilizada em cada etapa constou de:

1ª etapa: Definição de parâmetros e recolha de informação

Esta etapa permitiu a introdução, em formato digital, de informação referente a alguns dos factores que influenciam a carsificação, para utilização no sistema Arcview, nomeadamente:

- recolha de informação publicada relativa à litologia e estrutura do maciço em estudo;
- cartografia geológica à escala 1/5000, com auxílio de um aparelho GPS (ground positioning system) e do sistema ArcPad, assim como foto-interpretação geológica, para a delimitação das diferentes unidades litostratigráficas e identificação das estruturas existentes (falhas e fracturas);
- digitalização e georreferenciação das fotografias aéreas e respectiva interpretação;
- incorporação da altimetria e ortofotomapa no formato digital.

2ª etapa: Construção da base de dados e categorização da informação

Procedeu-se à categorização dos parâmetros descritores do sistema em classes, através de um valor numérico (ou índice) que traduz a aptidão ao desenvolvimento de endocarso. Aos valores mais altos do índice está associado um grau de aptidão elevado e aos valores mais baixos, um grau de aptidão baixo. A tabela 1 do capítulo **MODELO SIG** apresenta a categorização dos parâmetros do modelo.

3ª etapa: Desenvolvimento do modelo SIG

A primeira fase de processamento deste modelo é a análise e manipulação da informação relativa à fracturação que permitiu decompôr e extrair, como informação derivada, as características mais relevantes da estrutura do modelo físico para o tema em questão.

Foi desenvolvido um modelo para o factor fracturação (modelo de fracturação) e, em paralelo, criados novos elementos derivados de factores independentes da escala através de funções do sistema ARCVIEW.

Numa segunda fase da aplicação procedeu-se à integração ponderada dos parâmetros independentes da escala com os factores dependentes da escala (modelo de aptidão ao desenvolvimento de endocarso): O modelo final permitiu a criação de um mapa índice onde os valores mais elevados representam as zonas de maior aptidão para a sua ocorrência.

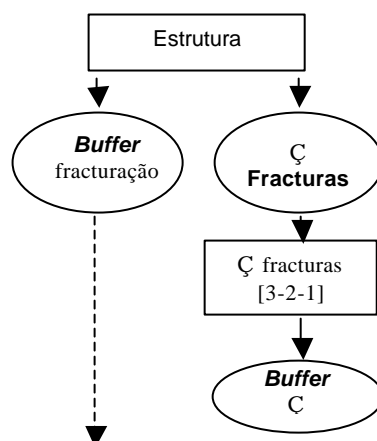
MODELO SIG

O modelo teórico geral desenvolve-se em duas etapas sequenciais, ambas formadas por modelos parciais de análise e ponderação dos vários parâmetros descritores do sistema:

Etapa 1 – Modelo geométrico de fracturação/relevo:

O modelo geométrico de fracturação faz a transformação morfológica, por partição, do parâmetro binário de fracturação (estrutura), em elementos de menores dimensões. Cada um destes elementos é categorizado consoante as relações de proximidade e sobreposição com os restantes. O algoritmo desenvolvido baseia-se na aplicação de primitivas da teoria dos conjuntos, em operações matemáticas de soma e no cálculo de distâncias euclidianas (*buffers* ou áreas de influência). Obtem-se um conjunto de elementos espaciais, categorizados por um valor numérico (ou índice) que representa, para cada local, o número de ocorrências da variável. O mapa de intensidade de fracturação é representado pela distribuição espacial dos elementos de fracturação.

Neste algoritmo a informação é manipulada em formato vectorial.



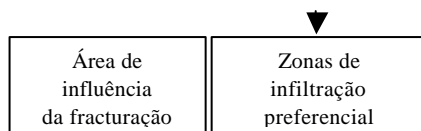


Figura 1 - Esquema simplificado do modelo geométrico de fracturação.

Etapa 2 – Modelo de aptidão ao desenvolvimento de Endocarso (ME):

Este modelo consiste na soma ponderada dos parâmetros descritores, condicionadores de carso profundo. O algoritmo utilizado tem também por base operações matemáticas de soma e de multiplicação. O produto final do modelo é uma matriz numérica onde os valores mais elevados do índice correspondem às zonas de maior aptidão à ocorrência de dissolução, ou sejam, aquelas de maior aptidão de desenvolvimento de endocarso. O Modelo de Aptidão à formação de Endocarso (MAE) pode ser descrito pela seguinte equação (1)

$$MAE = \sum_{i=1}^n (F_i \times P_i) \quad (eq. 1)$$

i - número de factores, 1 a 8

F_i - Factor de avaliação *i*

P_i - peso ou importância de cada factor *i*

Tabela 1 – Modelo de aptidão ao desenvolvimento de Endocarso.

Factores de endocarso		índice	Ponderação	Descrição
Factores intrínsecos - Independentes	Litologia	3 – elevado 2 – médio 1 – baixo 0 - nulo	1	Aptidão à dissolução
	Fracturação	1 – elevada 0 - baixa	1	Área de influência da fracturação
	Densidade intersecções	3 – elevado 2 – médio 1 - baixo	1	Zonas de infiltração preferencial
	Relevo (carta declives)	3 – elevado 2 – médio 1 - baixo	1	Potencial de infiltração
Factores Intrínsecos - Dependentes	Hidrologia	(*)	(*)	Potencial de dissolução
	Clima	(*)	(*)	Aptidão à dissolução
	Vegetação	(*)	(*)	Aptidão à infiltração
	Tempo	(*)	(*)	-
Factores extrínsecos - Independentes	Depósitos superficiais	0 – ausência 1 - presença	3	Zonas de dissolução

(*) – Estes parâmetros não foram considerados na aplicação do modelo pelo facto de não se haver unidades individualizáveis na área considerada.

Os ponderadores presentes na tabela revelam o valor que foi utilizado na aplicação do modelo à área de estudo deste trabalho. No entanto, é possível alterá-las para que se possa adaptar mais facilmente a qualquer outra região, visto que esses pesos podem variar em relação à zona utilizada como área piloto ou para que se possam estimar aqueles que realmente são geradores ou indicadores da ocorrência de carso profundo.

APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO

Aplicação do modelo SIG

Para testar a aplicação desenvolvida foi escolhida uma área piloto a Oeste de Sesimbra, concretamente na Cova da Mijona, onde se localizam as grutas do Zambujal e do Frade, apresentando assim potencial para a ocorrência de outras cavidades similares (figura 2).

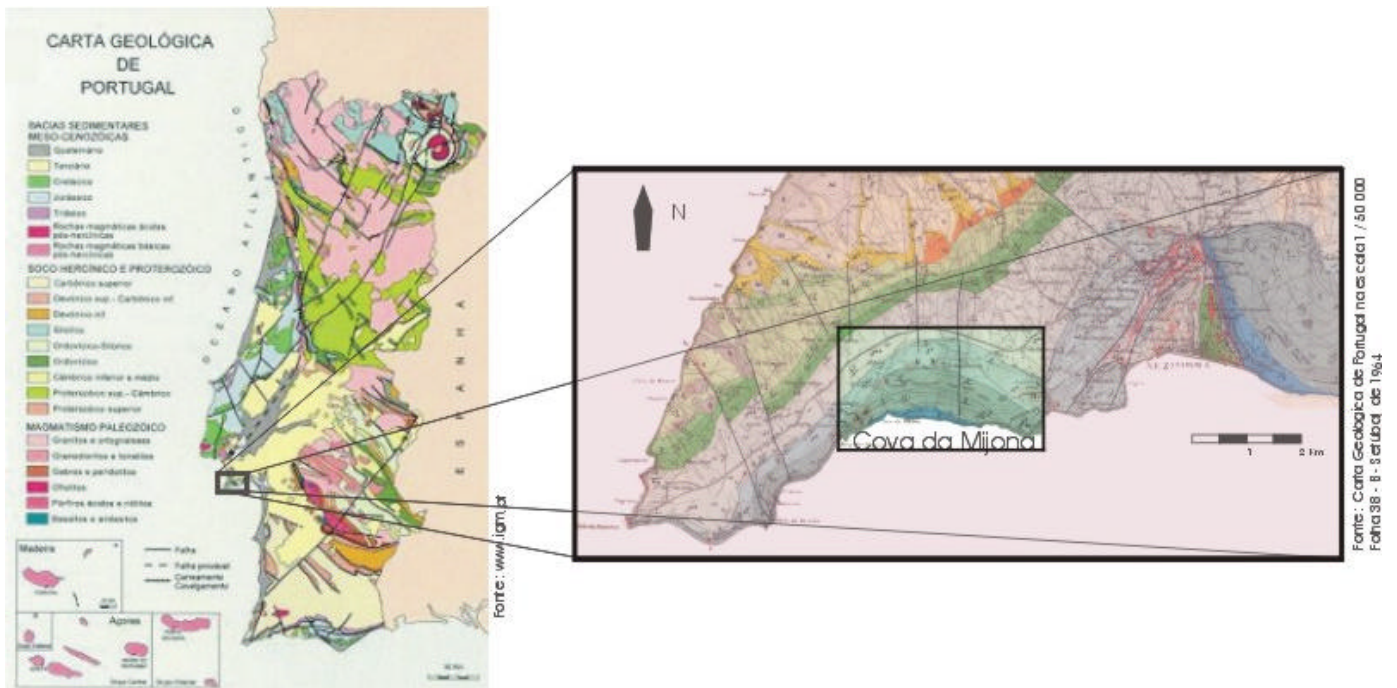


Figura 2 – Localização da área de estudo.

Dos oito factores intrínsecos de intervenção no sistema de carsificação (na prática, da fracturação – estrutura - derivam-se dois factores), apenas foram considerados neste trabalho aqueles que são independentes da escala: a litologia, a estrutura (fracturação+ densidade de intersecções) e o relevo (carta de declives), para além dos depósitos superficiais.

Numa primeira fase foi aplicado o modelo geométrico de fracturação. Este modelo permitiu a obtenção de dois temas derivados do factor “estrutura”: a fracturação e a densidade intersecções. Nas figuras 3 e 4 ilustram-se os resultados obtidos.

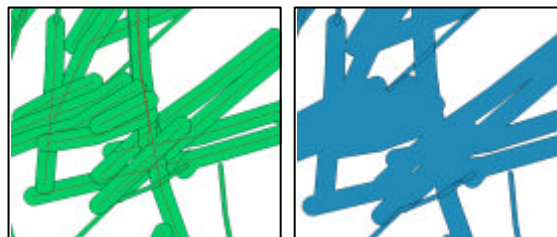


Figura 3 –Área de influência da fracturação - tema derivado do factor estrutura (esq.: antes de juntar os registos; dta.: depois de juntar os registos).

Modelo geométrico de fracturação – Ç de fracturação

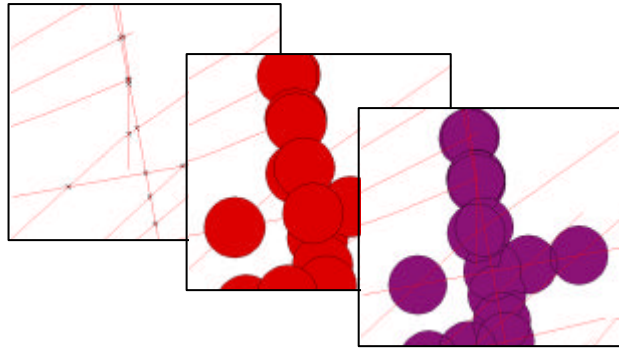


Figura 4 - Zonas de infiltração preferencial - tema derivado do factor estrutura (da esquerda para a direita: determinação das intersecções de linhas de um mesmo shapefile, geração de áreas de influência, intersecção das áreas de influência).

Na segunda fase do modelo MAE, procedeu-se à integração de todos os parâmetros através da aplicação da equação 1, utilizando os critérios expostos na tabela 1. Os resultados obtidos ilustram-se nas figuras 5 e 6. Os resultados da aplicação do MAE são então rasterizados e integrados na área de estudo.

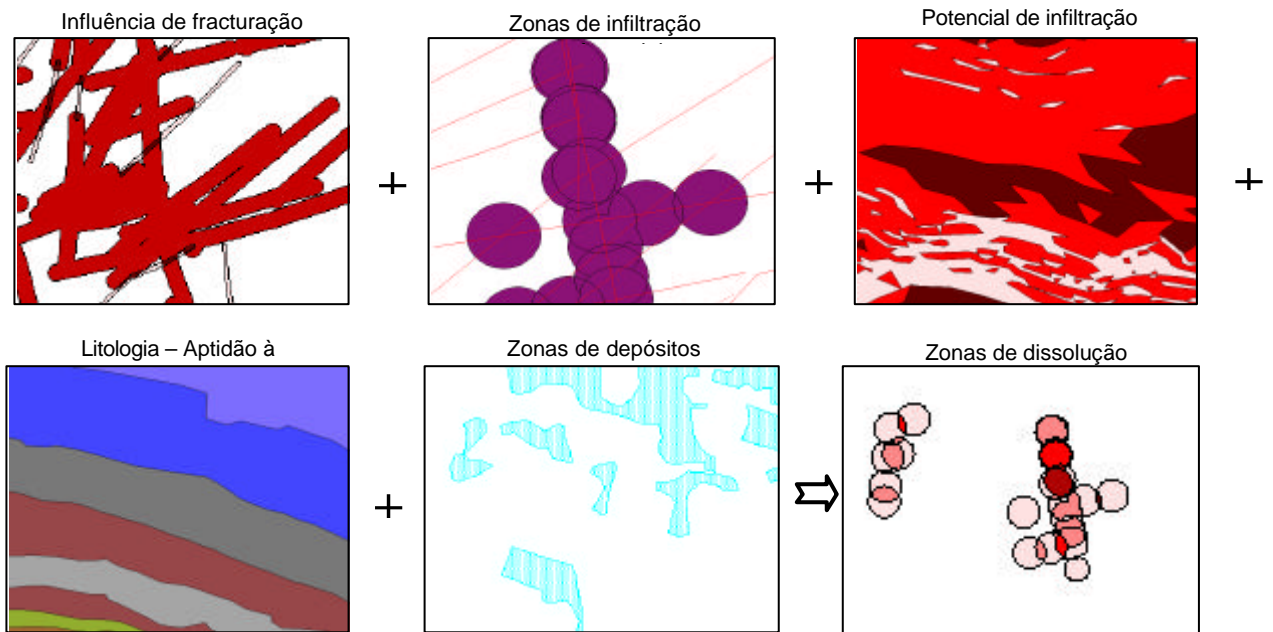


Figura 5 – Aptidão ao desenvolvimento de endocarso.

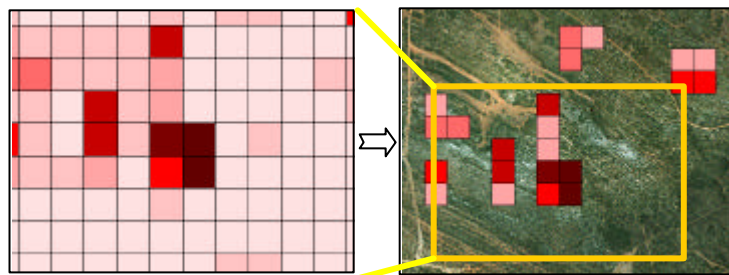


Figura 6 – Resultado do modelo final: áreas prováveis para o desenvolvimento de endocarso.

Avaliação de resultados

De forma a validar os resultados obtidos foram posteriormente realizados, de forma não sistemática, trabalhos de campo, que permitiram a identificação de estruturas cársticas de superfície (algares), eventualmente indiciadoras de um endocarso desenvolvido.

Na figura 7 localizam-se as estruturas cársticas identificadas na região, nomeadamente, 3 algares e uma gruta (Gruta do Zambujal), assinaladas na imagem por um círculo amarelo com 50m de diâmetro. São, também, assinaladas pela matriz do modelo final as áreas classificadas quanto à sua aptidão à formação de endocarso.

Apesar da amostragem ser reduzida salienta-se, mesmo assim, que todas as cavidades inventariadas se encontram a menos de trinta metros de zonas classificadas com um mínimo de 13 pontos. No entanto, há factores que poderão ainda diminuir este erro. Alguns deles são:

- a precisão do GPS utilizado é, actualmente, de cinco a dez metros nos eixos horizontais;
- não foi possível ortorrectificar as fotografias aéreas por falta de disponibilidade de informação sobre o voo, o que impossibilitou que a fracturação e o falhamento não estejam no local exacto sobre o ortofotomapa.

Por estas razões, pensa-se que o método desenvolvido é válido para o objectivo a que se propôs: identificar áreas de maior aptidão para a ocorrência de endocarso através da cartografia geológica e estrutural.

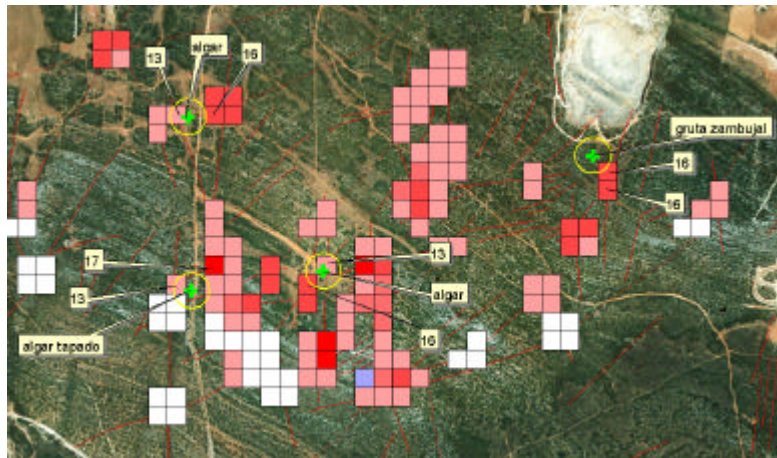






Fig. 7 – Resultado da aplicação do modelo de aptidão à área de estudo sobre ortofotomapa digital.

Legenda:

-  – localização de cavidades cársticas inventariadas no campo ou já conhecidas;
-  – classificação das áreas de aptidão à ocorrência de cavidades cársticas profundas: baixa (azul), média (branco), média-alta (rosa) e alta (vermelho);
-  – círculo de 25 metros de raio em torno das cavidades inventariadas;
-  – classificação final das áreas, de 0 (aptidão mínima) a 18 pontos (aptidão máxima).

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos pela aplicação desenvolvida confirmam que a dispersão da aptidão para ocorrência de endocarso é fortemente controlada pela fracturação.

A abordagem utilizada permitiu a criação de um mapa de locais com maior aptidão à ocorrência de estruturas endocársticas, com base em informação de superfície.

Os factores mais relevantes para o desenvolvimento destas estruturas foram seleccionados e categorizados em classes de aptidão; integrados no modelo SIG, permitiram definir os locais com maior potencial para a sua ocorrência.

Este modelo SIG poderá fornecer às entidades decisoras (*e.g.* Autarquias, Associações Espeleológicas, Parques Naturais, etc.) uma ferramenta importante para o processo de prospecção de áreas de interesse espeleológico, de inegável valor natural, estético e, por vezes, económico.

A ferramenta desenvolvida apresenta potencialidades para utilização em qualquer outra área geográfica que reúna um conjunto favorável de factores intrínsecos.

REFERÊNCIAS

1. **BLAIR, R.W., Jr. (1986)** – *Karst Landforms and Lakes, in Geomorphology from Space*, versão *online* no site da NASA, http://daac.gsfc.nasa.gov/DAAC_DOCS/geomorphology/GEO_HOME_PAGE.html).

2. **FORD, D.C. (1976)** - *Threshold and Limit Effects in Karst Geomorphology, in Thresholds in Geomorphology* (D.R. COATES and J.D. VITEK), *Dowdm & Culum, Inc.*, London, pp. 345-362.
3. **ZBYSZEWSKI, G & FERREIRA, O.V. (1965)** – *Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000, Folha 38-B*, Serv. Geol. Portugal, Lisboa.

AGRADECIMENTOS

O trabalho foi realizado no âmbito do Plano de Estágios para finalistas do Instituto para a Conservação da Natureza / Parque Natural da Arrábida, do qual usufruiu o primeiro autor. Os autores agradecem aos Profs. Drs. Carlos Costa, José António Almeida e Eng^o Paulo Caetano as valiosas discussões de que beneficiaram e as opiniões e sugestões que forneceram durante o trabalho.

Hugo VARGAS

hugo@ciga.fct.unl.pt

Hugo Vargas é *bolseiro de Investigação do Centro de Investigação em Geociências Aplicadas desde 2000 e finalista da licenciatura em Engenharia Geológica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, tendo participado em vários projectos utilizando primeiramente SIG, no âmbito do CIGA, como o Plano estratégico de Avaliação da Contaminação e Reabilitação de solos do Concelho do Seixal e o MINEO.*

José C. KULLBERG

jck@fct.unl.pt

José Carlos Kullberg é *Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, onde é responsável ou co-responsável de 7 disciplinas, de 3 licenciaturas, entre elas, Geologia Estrutural, Cartografia Geológica e Detecção Remota. Apresentou provas de Doutoramento no ano 2000, na especialidade de Geologia Estrutural. É autor ou co-autor de cerca de 30 artigos científicos, 10 dos quais em revistas internacionais e de mais de 50 de comunicação em reunião científicas nacionais e internacionais. Tem-se dedicado em especial ao estudo da evolução tectónica da Bacia Lusitânica, no âmbito do qual produziu a cartografia geológica estrutural de região meridional da Península de Setúbal e da região de Sintra. Participa/participou em cerca de 20 projectos de investigação científica, de cooperação internacional e de divulgação/ensino com financiamento público nacional, comunitário e privado.*

Graça BRITO

mgb@fct.unl.pt

Graça Brito é *Mestre em Georrecursos pelo Instituto Superior Técnico, licenciada em Engenharia Geológica pela Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL) onde actualmente é Assistente das disciplinas de Detecção Remota, Introdução à Geologia, disciplina de Geologia Geral para Engenheiros Geólogos e para Engenheiros Cívicos e da disciplina de Geoestatística e Tratamento de Dados, no Departamento de Ciências da Terra. Desde 1999 que desenvolve investigação no Centro de Investigação em Geociências Aplicadas (CIGA) da UNL onde aplica ferramentas de Geoestatística, Detecção Remota, Sistemas de Informação Geográfica e de Análise Multivariada de dados nas áreas de avaliação de recursos e contaminação de solos e águas. Colabora em projectos de investigação nas áreas da avaliação da contaminação de solos. É autora/co-autora de 26 comunicações, publicadas em congressos e revistas nacionais.*

Centro de Investigação em Geociências Aplicadas – FCT/UNL

Quinta da Torre

2829-516 Monte da Caparica

PORTUGAL

Tel: +351 21 294 83 49

Fax: +351 21 294 83 49

URL: <http://www.ciga.fct.unl.pt>