



FACULDADE DE LETRAS  
UNIVERSIDADE DE  
**COIMBRA**

Luís Miguel Conceição Silva dos Reis

***AVALIAÇÃO DO POTENCIAL  
ENDOCÁRSICO DO SECTOR  
SETENTRIONAL DO PLANALTO DE SANTO  
ANTÓNIO (MACIÇO CALCÁRIO  
ESTREMENHO, PORTUGAL CENTRAL)***

Dissertação de Mestrado em Geografia Física, Ambiente e Ordenamento do Território,  
orientada pelos Professores Doutores Luca Antonio Dimuccio e Lúcio Cunha,  
apresentada ao Departamento de Geografia e Turismo da Faculdade de Letras da  
Universidade de Coimbra

outubro de 2021

# FACULDADE DE LETRAS

## AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENDOCÁRSICO DO SECTOR SETENTRIONAL DO PLANALTO DE SANTO ANTÓNIO (MACIÇO CALCÁRIO ESTREMENHO, PORTUGAL CENTRAL)

### Ficha Técnica

<b>Tipo de trabalho</b>	<b>Dissertação de Mestrado</b>
<b>Título</b>	<b>AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENDOCÁRSICO DO SECTOR SETENTRIONAL DO PLANALTO DE SANTO ANTÓNIO (MACIÇO CALCÁRIO ESTREMENHO, PORTUGAL CENTRAL)</b>
<b>Autor</b>	<b>Luís Miguel Conceição Silva dos Reis</b>
<b>Orientadores</b>	<b>Prof. Doutor Luca Antonio Dimuccio Prof. Doutor Lúcio José Sobral da Cunha</b>
<b>Júri</b>	<b>Presidente: Prof. Doutora Adélia Jesus Nobre Nunes Vogais: 1. Prof. Doutor António Alberto Teixeira Gomes 2. Prof. Doutor Luca Antonio Dimuccio</b>
<b>Identificação do Curso</b>	<b>2º Ciclo em Geografia Física, Ambiente e Ordenamento do Território</b>
<b>Área científica Especialidade/Ramo</b>	<b>Geografia Geografia Física, Ambiente e Ordenamento do Território</b>
<b>Data da defesa</b>	<b>09-12-2021</b>
<b>Classificação</b>	<b>19 valores</b>



*“Este maciço é uma verdadeira esponja,  
cada vez mais corroída à medida que se desce para a profundidade [...]”.*

FLEURY (1925), a propósito do endocarso do Maciço Calcário Estremenho, em *Portugal Subterrâneo*.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar um agradecimento especial à minha esposa e à minha filha pela paciência demonstrada nos momentos em que não pude estar presente.

Aos meus orientadores, Doutores Lúcio Cunha e Luca Antonio Dimuccio, pelas sugestões, grande disponibilidade e partilha de conhecimentos. O seu espírito crítico contribuiu decisivamente para melhorar a qualidade deste trabalho.

Aos colegas de trabalho, pela disponibilidade na troca de ideias. As suas sugestões também contribuíram para o desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Município de Constância, por me fornecer as condições laborais necessárias para me deslocar a Coimbra, quando foi necessário realizar pesquisa bibliográfica ou para compromissos com os orientadores.

Ao Município de Porto de Mós e ao Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, IP (ICNF), pela disponibilização de dados cartográficos. Estes dados foram determinantes para o incremento da qualidade na cartografia temática, para a celeridade das tarefas de geoprocessamento e para o aumento do rigor na análise dos resultados.

## RESUMO

A avaliação do potencial de carsificação, sobretudo no que concerne a componente subterrânea, num maciço lítico carbonatado, é uma tarefa sempre complexa e de difícil execução devido ao elevado número de fatores condicionantes envolvidos, aos seus diferentes graus de influência e ao facto de estes estarem sempre (ou quase sempre) interrelacionados, como, por exemplo, a estrutura geológica e a permeabilidade. É principal propósito deste trabalho a produção de um modelo cartográfico que permita representar espacialmente a probabilidade da existência de formas cársticas em profundidade (e.g., grutas), ou seja, o “potencial endocársico”.

Incidindo sobre o sector setentrional do Planalto de Santo António, no Maciço Calcário Estremenho (Portugal Central), foram considerados para a modelação espacial do potencial endocársico os seguintes fatores condicionantes: litologia (a que se juntam as características faciológicas e estratigráficas - unidades litostratigráficas), estrutura geológica (onde se inclui a fraturação e a geometria das camadas rochosas), topografia e ocupação do solo. Antes de mais, tentou-se perceber a influência de cada um destes fatores para a carsificação subterrânea e com essa informação estabelecer uma hierarquia da sua importância relativa.

Com base nos resultados obtidos, e por ordem de importância, verificamos que na área de estudo são fatores potenciadores da carsificação subterrânea (à escala local) as seguintes características geológicas, geomorfológicas e edáficas: (i) rochas carbonatadas relativamente mais puras e com textura mais fina que, geralmente, pertencem às sucessões estratigráficas com estratos mais espessos e pouco inclinados; (ii) existência de sucessões carbonatadas mais heterogêneas onde, juntamente com os estratos mais solúveis, interestratificam outros conjuntos líticos mais insolúveis; (iii) áreas com maior densidade de fraturação; (iv) áreas com maior diferença altimétrica em relação aos locais de recarga (tanto difusa como concentrada) e de descarga (exurgências) do sistema – *i.e.*, as áreas com maior energia do relevo; (v) por último, áreas com uma cobertura detrítica, de solo e vegetação que originam um atraso na infiltração e na percolação subsuperficial, ao mesmo tempo que tornam as águas meteóricas mais agressivas.

A avaliação dos fatores condicionantes da carsificação subterrânea baseou-se na análise multicritério, sendo esta materializada pelo Processo de Análise Hierárquica (AHP - *Analytic Hierarchy Process*), onde a ponderação atribuída aos fatores destacou claramente a importância da litologia (juntamente com as características das fácies) e da fraturação. O modelo cartográfico do potencial de carsificação subterrânea foi construído em SIG (Sistemas de Informação Geográfica) e a sua avaliação/verificação realizada através da correlação com a localização das entradas das cavidades naturais subterrâneas

conhecidas. Os resultados obtidos parecem bastante promissores, na medida em que as entradas da maioria das cavidades conhecidas no sector setentrional do Planalto de Santo António se localizam nas áreas classificadas com elevado a muito elevado potencial endocársico.

**Palavras-chave:** Potencial endocársico; Análise multicritério; Processo de Análise Hierárquica (PAH); Sistemas de Informação Geográfica (SIG); Maciço Calcário Estremenho.

## ABSTRACT

The evaluation of the karstification potential, especially regarding the underground component, in a carbonate massif, is always a complex and difficult task to carry out, due to the high number of conditioning factors involved, their different degrees of influence and the fact that these are always (or almost always) interrelated, such as geological structure and permeability. The main purpose of this work is to produce a cartographic model that allows to spatially represent the probability of the existence of subterranean karst forms (*e.g.*, caves), which represents the so-called “endokarst potential”.

Focusing on the northern sector of the Santo António plateau, in the Estremadura Limestone Massif (Centre of Portugal), the following conditioning factors were considered for the spatial modeling of endokarst potential: lithology (with the faciological and stratonomical characteristics - lithostratigraphic units), geological structure (which includes fractures and geometry of carbonate rock layers), topography and soil cover. First, we tried to understand the influence of each of these factors on underground karstification and, with that information, establish a hierarchy of their relative importance.

Based on the results obtained, and in order of importance, we found that in the study area the following geological, geomorphological and edaphic characteristics are potentiating factors for underground karstification (at local scale): (i) relative pure carbonate rocks with more thin texture, which generally belong to stratigraphic successions with thicker and less inclined strata; (ii) existence of more heterogeneous carbonate successions where, together with the more soluble strata, they interstratify other more insoluble lithic bodies; (iii) the areas with the highest fracture density; (iv) the areas with the greatest altimetric difference in relation to the recharge (both diffuse and concentrated) and discharge (karst springs) sites of the system - *i.e.*, the areas with higher relief energy; (v) the existence of a detrital, soil and vegetation cover that cause a delay in infiltration and subsurface percolation, while making meteoric waters more aggressive.

The evaluation of the conditioning factors of underground karstification was based on multi-criteria analysis, which was materialized by the Analytic Hierarchy Process (AHP), where the weighting attributed to the factors clearly highlighted the importance of lithology (along with the facies characteristics) and fractures. The cartographic model of the underground karstification potential was built in a GIS (Geographic Information Systems) and its validation was carried out through the correlation with the location of the known caves entrances. The results obtained seem quite

promising, as the entrances of the most known caves in the northern sector of the Santo António plateau are in areas classified as having high to very high endokarst potential.

**Key words:** Endokarst potential; Multi-criteria analysis; Analytic Hierarchy Process (AHP); GIS (Geographic Information Systems); Estremadura Limestone Massif.



## Índice geral

Índice de figuras .....	ii
Índice de fotografias.....	iii
Índice de quadros.....	iii
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Objetivos .....	3
1.2. Metodologia .....	3
1.3. Organização da dissertação .....	6
2. O CARSO E A CARSIFICAÇÃO.....	8
3. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES RELATIVAS AOS FATORES CONDICIONANTES DA CARSIFICAÇÃO .....	11
3.1. Litologia e litostratigrafia .....	11
3.2. Estrutura geológica .....	20
3.2.1. Geometria das camadas rochosas .....	20
3.2.2. Fraturação .....	23
3.3. Topografia .....	26
3.4. Ocupação do solo.....	28
4. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO DA ÁREA DE ESTUDO .....	31
5. CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO REGIONAL.....	33
5.1. Geologia .....	33
5.2. Geomorfologia .....	37
5.2.1. Formas cársticas superficiais .....	43
5.2.2. Formas cársticas subterrâneas.....	49
6. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENDOCÁRSICO NA ÁREA DE ESTUDO .....	53
6.1. Aplicabilidade da análise multivariada.....	53
6.2. Fatores condicionantes .....	59
6.2.1. Unidades litostratigráficas e geometria das camadas rochosas.....	59
6.2.2. Densidade da fraturação.....	69
6.2.3. Energia do relevo .....	72

6.2.4. Ocupação do solo.....	75
6.3. Construção do modelo cartográfico e respetiva verificação .....	77
7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	83
8. CONCLUSÕES.....	92
BIBLIOGRAFIA.....	95
DADOS CARTOGRÁFICOS.....	106

### Índice de figuras

Figura 1 - Fluxograma metodológico adotado para a construção de um modelo que permita cartografar o potencial endocársico na área de estudo. ....	5
Figura 2 - Modelo conceptual ilustrativo da deposição de calcários, dolomias e evaporitos .....	12
Figura 3 - Classificação das rochas carbonatadas segundo LEIGHTON & PENDEXTER (1962). ....	14
Figura 4 - Classificação composicional de rochas carbonatadas de FOLK (1959, 1962) .....	17
Figura 5 - Modelos conceptuais de sucessões carbonatadas de águas rasas mais comuns.....	19
Figura 6 - Desenvolvimento cársico em estruturas geológicas complexas dos Alpes franceses, em Samoens. ....	21
Figura 7 - Orientação e desenvolvimento de uma cavidade em torno de uma falha principal em Black Shiver Pot, Yorkshire .....	24
Figura 8 - Superfície topográfica associada às dolinas.....	27
Figura 9 - Principais zonas do ambiente diagenético meteórico .....	29
Figura 10 - Enquadramento geográfico do sector setentrional do Planalto de Santo António.....	32
Figura 11 - Enquadramento geográfico e tectónico da Bacia Lusitânica e de outras bacias da Margem Ocidental Ibérica .....	34
Figura 12 - Enquadramento do Maciço Calcário Estremenho e da área de estudo no Sector Central da Bacia Lusitânica .....	35
Figura 13 - Enquadramento geomorfológico da área de estudo .....	40
Figura 14 - Esboço geomorfológico da área de estudo.....	48
Figura 15 - Cavidades subterrâneas naturais inventariadas e nascentes cársicas no Maciço Calcário Estremenho. ....	52
Figura 16 - Mapa litológico do sector setentrional do Planalto de Santo António.....	60
Figura 17 - Mapa da suscetibilidade à carsificação para as unidades litostratigráficas no sector setentrional do Planalto de Santo António.....	68

Figura 18 - Mapa da densidade da fraturação com a localização de fraturas e lineamentos no sector setentrional do Planalto de Santo António. ....	71
Figura 19 - Mapa hipsométrico do sector setentrional do Planalto de Santo António. ....	73
Figura 20 - Mapa da energia do relevo no sector setentrional do Planalto de Santo António.....	74
Figura 21 - Mapa de ocupação do solo no sector setentrional do Planalto de Santo António, segundo a Carta de Ocupação do Solo 2018. ....	76
Figura 22 - Mapa com a definição das áreas de treino e teste na área de estudo. ....	78
Figura 23 - Curva de sucesso para a área de estudo. ....	79
Figura 24 - Mapa do potencial endocársico no sector setentrional do Planalto de Santo António. ....	82
Figura 25 - Mapa do potencial endocársico e localização de cavidades subterrâneas conhecidas no sector setentrional do Planalto de Santo António. ....	84
Figura 26 - Percentagem de cavidades subterrâneas por classe de potencial endocársico na área de estudo.....	85
Figura 27 - Número de cavidades subterrâneas inventariadas por unidade litostratigráfica na área de estudo .....	85
Figura 28 - Mapa litológico do sector setentrional do Planalto de Santo António segundo CRISPIM (1995). ....	88

### **Índice de fotografias**

Fotografia 1 - Lapiás em mesa no Planalto de Santo António .....	44
Fotografia 2 - Carso enterrado no Planalto de São Mamede.....	44
Fotografia 3 - Chão das Pias no sector setentrional do Planalto de Santo António .....	45
Fotografia 4 - Depressão de Alvados.....	46
Fotografia 5 - Exurgência temporária na Fórnea de Alvados .....	50

### **Índice de quadros**

Quadro 1 - Classificação textural de rochas carbonatadas .....	16
Quadro 2 - Terminologia utilizada para a espessura das camadas e o espaçamento das diaclases.....	22
Quadro 3 - Matriz de comparações e cálculo do vetor próprio normalizado.....	56
Quadro 4 - Ponderação proposta por SAATY (1990).....	57
Quadro 5 - Valores de CA em função da ordem da matriz. ....	57
Quadro 6 - Fatores de carsificação e suas classes para a área de estudo.....	58

Quadro 7 - Correspondência entre unidades litostratigráficas jurássicas propostas em AZERÊDO (2007), Folha 27-A do Instituto Geológico e Mineiro (1998) e MANUPPELA <i>et al.</i> (2000).....	61
Quadro 8 - Avaliação da suscetibilidade à carsificação nas várias componentes das unidades litostratigráficas existentes na área de estudo .....	64
Quadro 9 - Suscetibilidade à carsificação das unidades litostratigráficas da área de estudo e correspondência com as formações propostas por AZERÊDO (2007), Folha 27-A do Instituto Geológico e Mineiro (1998) e MANUPPELA <i>et al.</i> (2000).....	67
Quadro 10 - Cálculo da ponderação para o fator “Unidades litostratigráficas” através do método da comparação par a par .....	80
Quadro 11 - Cálculo da ponderação para o fator “Densidade da fraturação” através do método comparação par a par .....	80
Quadro 12 - Cálculo da ponderação para o fator “Energia do relevo” através do método comparação par a par .....	81
Quadro 13 - Cálculo da ponderação para o fator “Ocupação do solo” através do método comparação par a par .....	81
Quadro 14 - Cálculo da ponderação para os fatores de carsificação através do método comparação par a par.....	81
Quadro 15 - Comparação das formações classificadas e cartografadas por CRISPIM (1995) quanto à carsificação relativamente às classes do potencial endocársico .....	90
Quadro 16 - Cavidades subterrâneas naturais inventariadas por classes dos fatores de carsificação. 91	

## 1. INTRODUÇÃO

A construção de um modelo cartográfico preditivo<sup>1</sup> tem tanto de aliciante como de complexo (LONGLEY *et al.*, 2011). Trata-se da compilação de informação proveniente de vários domínios do conhecimento (relativa a um determinado território), a sua avaliação e conjugação para a construção de um modelo explicativo da distribuição espacial de um determinado fenómeno físico ou humano, sendo tarefas que se enquadram também nas competências do geógrafo. Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) incluem algumas das ferramentas mais importantes de que o geógrafo dispõe para a execução dessas tarefas, na medida em que permitem reunir rapidamente toda a informação necessária numa base de dados georreferenciada, aplicar métodos de análise de forma automática/semiautomática e disponibilizar celeremente os resultados de várias formas, tais como: mapas, gráficos, ficheiros de dados geográficos vetoriais/matriciais (*ibidem*). No entanto, importa referir que neste contexto o geógrafo deve necessariamente estar munido das competências e sensibilidades necessárias para aferir a qualidade da informação de base que utiliza nos seus estudos e para realizar uma análise crítica dos resultados computacionais alcançados, tornando-se a sua formação multidisciplinar claramente numa mais-valia (GOODCHILD, 2009).

Centrada no domínio da geomorfologia cársica (MARTINS, 1949; JENNINGS, 1985; WHITE, 1988; CUNHA, 1993; FORD & WILLIAMS, 2007; RODRIGUES *et al.*, 2007; DIMUCCIO, 2017; entre outros), a presente dissertação baseia-se na construção de um modelo cartográfico que permita a representação espacial do potencial de carsificação subterrânea (= potencial endocársico<sup>2</sup>) numa pequena área amostra do mais emblemático e sugestivo maciço carbonatado e carsificado de Portugal - o Maciço Calcário Estremenho (*sensu* MARTINS, 1949). Para esta empreitada, os SIG e a análise multicritério são as principais ferramentas utilizadas, porém sempre aliadas à pesquisa bibliográfica, sobre o tema e a área de estudo. Escolheu-se como área amostra o sector setentrional do Planalto de Santo António, já considerado em vários estudos anteriores, muitos dos quais abordam aspetos particulares e gerais da geologia sedimentar carbonatada (AZERÊDO, 1993, 1998, 2007) e outros, ainda que tenham objetivos mais específicos e bem definidos no campo da geologia estrutural e da geomorfologia (*e.g.*, CRISPIM, 1995; RODRIGUES, 1998, 2020; CARVALHO, 2013, 2018), acabam por fazer análises mais sistemáticas. Nestes estudos, assim como naqueles que os antecederam ou que seguiram, consta informação bastante útil para o presente trabalho, como por exemplo a identificação pormenorizada das fácies

---

<sup>1</sup> Modelo assente em dados geográficos que é entendido como expressão do modo como o território funciona. Este modelo procura representar os processos naturais numa perspetiva preditiva (previsão), sendo a sua construção baseada em cálculos ou combinação de várias camadas de informação geográfica. Normalmente a informação geográfica é manipulada em múltiplas fases (LONGLEY *et al.* 2011).

<sup>2</sup> Referente ao carso subterrâneo ou carso profundo (MARTINS, 1949). Respeitante aos processos e formas cársicas em profundidade (CUNHA, 1988; CRISPIM, 1995).

carbonatadas e a avaliação geral da suscetibilidade à carsificação das unidades litostratigráficas do maciço (CRISPIM, 1992).

A escolha do tema desta dissertação deve-se à preferência pela Geografia Física e é, em certa medida, a continuação de um trabalho iniciado em 2009 na disciplina de “Morfodinâmicas Actuais”<sup>3</sup>, com o título “Processos Endocársicos Actuais (Análise de factores potenciadores da carsificação em profundidade)”. Na altura, por razões de ordem pessoal, não houve a possibilidade de continuar o trabalho, mas a ideia de compreender melhor os factores que contribuem para a formação de cavidades subterrâneas no carso manteve-se sempre presente. A este estímulo juntam-se as vivências pessoais no Maciço Calcário Estremenho, a maior parte das quais na localidade com topónimo mais cársico/endocársico da região, Lapa Furada. A opção por uma abordagem mais centrada nos SIG advém de alguma formação académica na área da Engenharia Geográfica e da experiência profissional.

Por outro lado, a motivação para a temática da carsificação subterrânea está também relacionada com a importância que o conhecimento do endocarso representa para o Ser Humano. A ocupação humana dos territórios cársicos deve ser feita através de um Planeamento e Ordenamento do Território que tenha em conta as fragilidades inerentes a este tipo de ambiente natural, em particular, os aspetos relacionados com os recursos hídricos (disponibilidade e vulnerabilidade), os riscos naturais (*e.g.*, abatimento de cavidades, desabamentos, inundações rápidas de depressões de origem cársica) e a extração de recursos minerais, nomeadamente a pedra (WHITE, 1988; CRISPIM, 1995; RODRIGUES, 1998). Mas o ambiente cársico não possui apenas condicionantes às atividades humanas, existe toda uma paisagem peculiar (por vezes espetacular) a usufruir (BRILHA, 2005; CUNHA *et al.*, 2014; CUNHA *et al.*, 2018). Em profundidade, essa paisagem torna-se ainda mais interessante, quer do ponto de vista do geoturismo (*e.g.*, espeleoturismo) (RODRIGUES *et al.*, 2017; TORRES, *et al.*, 2018), quer no âmbito científico e didático-pedagógico. A escolha da área de estudo derivou também do facto do Maciço Calcário Estremenho ser considerado um maciço carbonatado com um carso subterrâneo bastante desenvolvido, principalmente no Planalto de Santo António (FLEURY, 1925; MARTINS, 1949; THOMAS, 1985; CRISPIM, 1992), onde os grupos de espeleólogos locais, o Parque Natural das Serras de Aire e Candeeiros (PNSAC) e o Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, IP (ICNF) têm feito um trabalho notável na inventariação, exploração e divulgação científica das cavidades (CANAIS & FERNANDES, 1999).

---

<sup>3</sup> Disciplina lecionada pelo Prof. Doutor Lúcio Cunha e que fazia parte do plano de estudos do Mestrado em Geografia Física - Ambiente e Ordenamento do Território do ano letivo 2009/2010.

### **1.1. Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho é identificar, analisar e ponderar os fatores condicionantes da carsificação subterrânea que afeta as unidades carbonatadas jurássicas no sector setentrional do Planalto de Santo António, no Maciço Calcário Estremenho (Portugal Central). Com base numa análise multicritério, em SIG, pretende-se avaliar o potencial endocársico à escala local. É também nosso objetivo produzir um modelo cartográfico que represente espacialmente o potencial endocársico desta área de estudo. Finalmente, pretende-se avaliar/verificar o modelo cartográfico produzido através das evidências endocársicas conhecidas e inventariadas até ao momento. Este modelo cartográfico permitirá representar cartograficamente áreas preferenciais para o desenvolvimento de cavidades naturais que, devido às suas características, terá também um carácter preditivo e, portanto, de extrema utilidade para o Planeamento e Ordenamento do Território.

### **1.2. Metodologia**

A metodologia adotada no presente trabalho encontra-se descrita no fluxograma da Figura 1. Partimos da pesquisa de fontes de informação que permitissem selecionar uma área de estudo adequada aos objetivos (*e.g.*, a existência de informação espacializada sobre o endocarso, como a localização das entradas de cavidades naturais), depois, procedemos à recolha exaustiva de toda a informação geográfica, geológica e geomorfológica sobre a área de estudo que servisse para a construção do modelo cartográfico: litologia (a que se juntam as características faciológicas e estratonómicas – unidades litostratigráficas), estrutura geológica (onde se inclui a fraturação e a geometria das camadas rochosas), topografia e ocupação do solo. Todas as informações foram preparadas para serem trabalhadas em SIG.

Com toda a informação recolhida importava escolher o melhor método de análise. Como tínhamos vários fatores influenciadores da carsificação a ponderar, com dados quantitativos e qualitativos, foi necessário utilizar um dos métodos de análise multicritério. Optámos pelo Processo de Análise Hierárquica (AHP - *Analytic Hierarchy Process*) (SAATY, 1988, 1990, 2008, 2009; FIGUEIREDO, 2001; SAATY *et al.*, 2001; RAMOS *et al.*, 2014), que nos permitiu a ponderação desses fatores (variáveis), a sua adequação ao modelo e o confronto espacial dos resultados com os dados do endocarso conhecidos. Houve também a necessidade de procedemos à desagregação da informação litológica disponível para a área de estudo, com o objetivo de reter sobretudo os dados relativos às características que, de forma mais evidente, e de acordo com os pressupostos teóricos predefinidos e suportado pela literatura da especialidade (RAUCH & WHITE, 1970; WALTHAM, 1981; JAMES & CHOQUETTE, 1984;

KLIMCHOUK *et al.*, 2000; SALOMON, 2000; FORD & WILLIAMS, 2007; AULER, 2013; BARTON, 2013; NOIREL *et al.*, 2013; entre outros), parecem influenciar a carsificação subterrânea. Sempre que justificável, utilizámos técnicas de representação cartográfica digital que nos facilitaram a análise dos dados e a atribuição das ponderações sobre os fatores acima referidos, como, por exemplo, o mapa da energia do relevo (BAIONI & TRAMONTANA, 2017).

O modelo cartográfico do potencial endocársico construído foi sucessivamente avaliado através de uma sobreposição espacial com a localização das entradas das cavidades naturais subterrâneas inventariadas na área de estudo, assim como, com os dados provenientes do estudo prévio realizado por CRISPIM (1995). No entanto, importa referir que os dados relativos à localização das entradas das cavidades conhecidas são claramente incompletos, mas, ainda assim, significativos para a área de estudo. Grande parte destes dados foram cedidos pelo ICNF e outros foram inventariados e digitalizados a partir de publicações do PNSAC. A verificação da capacidade preditiva do modelo baseou-se na análise das curvas de sucesso elaboradas através dos resultados do binómio potencial endocársico - localização da entrada das cavidades para ambas as subáreas de treino e de teste, assim como para toda a área de estudo (BI & BENNETT, 2003; GHUNG & FABBRI, 2003; GUZZETI *et al.*, 2005; OLIVEIRA, 2012).

Além dos dados acima referidos, utilizámos informação proveniente da cartografia oficial em formato vetorial (*e.g.*, cartografia 1:10 000 cedida pelo Município de Porto de Mós), que nos permitiu a construção do Modelo Digital de Elevação (MDE), a caracterização da ocupação do solo e a análise da geologia. Outra informação cartográfica vetorial foi georreferenciada tendo como base trabalhos prévios realizados no Maciço Calcário Estremenho e publicados por outros autores (AZERÊDO, 1993; CRISPIM, 1995; CARVALHO, 2013, 2018).

Para a realização do presente trabalho fizemos ainda uso de algumas ferramentas computacionais, nomeadamente a folha de cálculo *Microsoft Office Excel* (GOEPEL, 2018) e o *software SIG ArcGIS 10.7.1* da *ESRI*. Neste último utilizámos sobretudo as extensões *Spatial Analyst* e *3D Analyst* (LONGLEY *et al.*, 2011).



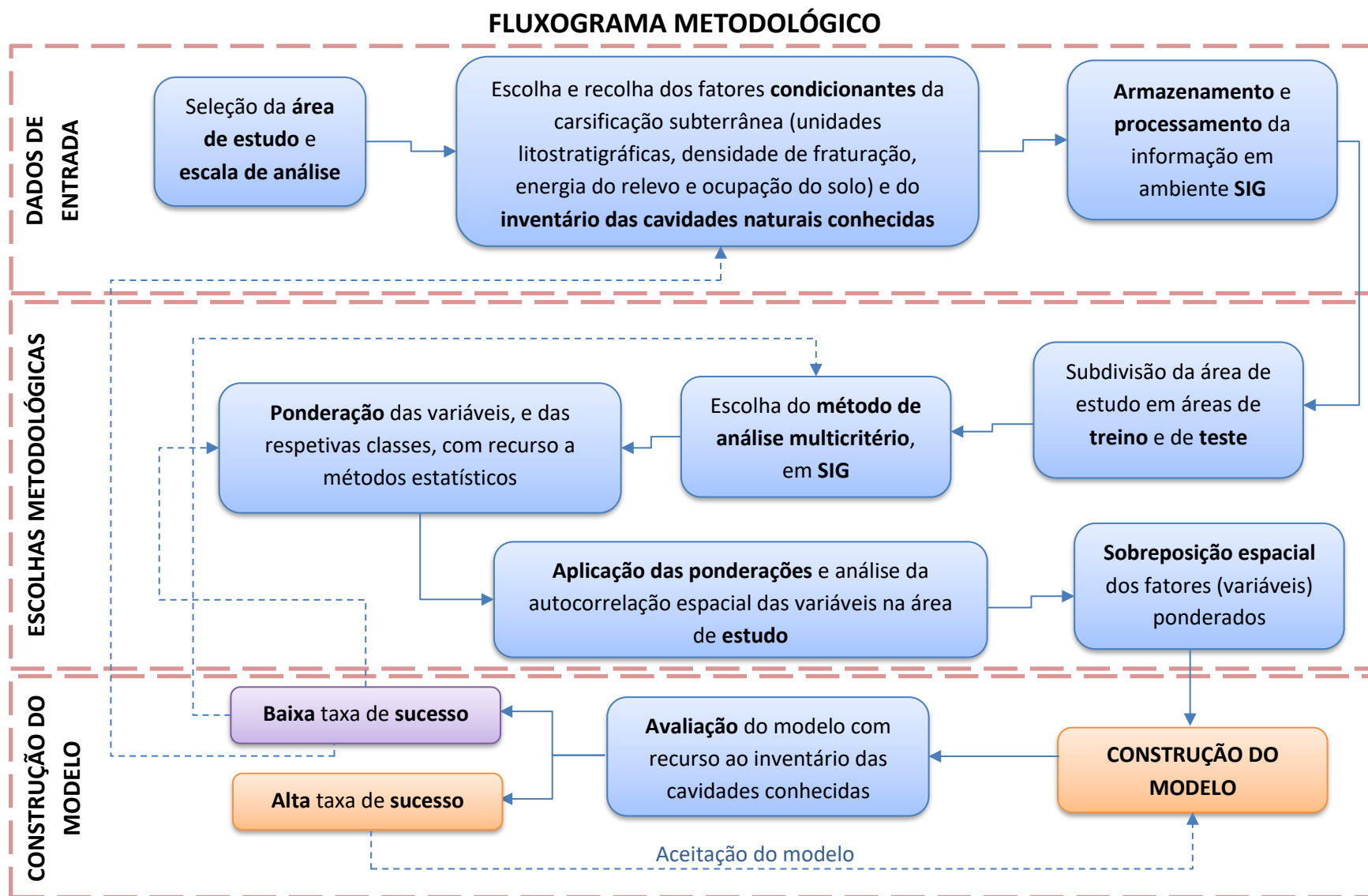


Figura 1 - Fluxograma metodológico adotado para a construção de um modelo que permita cartografar o potencial endocársico na área de estudo.

### 1.3. Organização da dissertação

O presente trabalho inicia-se com uma abordagem conceptual do carso e dos processos/mecanismos de carsificação (capítulo 2), num entendimento geral sobre o significado geomorfológico deste tipo de modelado (geossistémico - *sensu* BERTRAND, 1982; MENDES & DIMUCCIO, 2013; DIMUCCIO, 2017) e as suas diferentes manifestações. No capítulo 3, procedemos à explanação mais exaustiva acerca dos fatores que influenciam a carsificação em geral (superficial e subterrânea), nomeadamente a litologia, estrutura geológica, topografia e ocupação do solo. Sabemos, à partida, que existem fatores que influenciam em maior grau a carsificação (*e.g.*, litologia e estrutura geológica). Sabemos, também, que a informação bibliográfica disponível sobre estes fatores condicionantes, numa determinada área, é quase sempre relativamente desigual, sendo mais escassa para aqueles que são tidos como menos importantes para a carsificação, nomeadamente a topografia (aqui analisada através da energia do relevo) e a ocupação do solo.

Assim, após um breve enquadramento geográfico da área de estudo (capítulo 4), no capítulo 5 é feita também a sua caracterização geológica e geomorfológica, onde o ponto de partida é a identificação, em traços muito gerais, da evolução da mais geral da Bacia Lusitânica ou Lusitaniana (*sensu* PALAIN, 1976; SOARES *et al.*, 1993; KULLBERG *et al.*, 2013; 2014a, b; e referências neles incluídas). Na geomorfologia apresentamos alguns dos aspetos que contribuem para a individualidade do Maciço Calcário Estremenho (MARTINS, 1949; FERREIRA *et al.*, 1988; CRISPIM, 1995; RODRIGUES, 1998), prosseguindo para a identificação das principais formas cársicas - superficiais e subterrâneas.

No capítulo 6 apresentamos os passos seguidos para a modelação do potencial endocársico na área estudo, nomeadamente as técnicas de análise utilizadas (Processo de Análise Hierárquica) e a descrição dos fatores condicionantes escolhidos para integrar no modelo: (i) unidades litostratigráficas e geometria das camadas rochosas, (ii) densidade de fraturação, (iii) energia do relevo e (iv) ocupação do solo. A avaliação da eficácia do modelo cartográfico construído, ou, se preferimos, a verificação da sua capacidade preditiva, passou pela elaboração das curvas de sucesso relativas aos resultados alcançados em comparação com a localização das entradas das cavidades naturais subterrâneas conhecidas. No capítulo 7 são analisados e discutidos estes resultados cartográficos e sobrepostos às unidades litostratigráficas classificadas quanto à suscetibilidade a carsificação por CRISPIM (1995).

No capítulo conclusivo (8) fazemos uma retrospectiva do que foi apreendido com o desenvolvimento do trabalho, tecemos algumas considerações sobre o cumprimento dos objetivos propostos, dificuldades sentidas e apresentamos propostas para desenvolvimentos futuros.

Por último, incluímos uma lista bibliográfica exaustiva, procurando mostrar as referências mais atuais possível, mas também as que representam significado histórico e que muitas das vezes estão na origem das definições, explicações, teorias, etc. Em assuntos menos consensuais apresentamos referências de autores com diferentes visões/teorias. Também fazemos referência aos dados cartográficos (vetoriais e matriciais), provenientes de diversas fontes e com diferentes escalas de representação, que permitiram a construção do modelo, assim como dos vários mapas apresentados na dissertação.

## 2. O CARSO E A CARSIFICAÇÃO

A noção de carso (em português) diz respeito à palavra germânica “*karst*” que foi adotada como termo científico para designar a paisagem da região nordeste dos Montes Dináricos, referida como “*Kras*” em esloveno e que representa o “Carso Clássico” (GAMS, 1993; KRANJC, 2001). Numa abordagem tradicional, o carso define-se como o modelado desenvolvido em rochas solúveis, sobretudo carbonatadas (calcários e dolomias), que resulta principalmente da dissolução da rocha por águas naturais ao longo de caminhos (descontinuidades mecânicas) providenciados essencialmente pela estrutura geológica do maciço (JENNINGS, 1985; SOARES, 1998/2001; PALMER, 2007; FORD & WILLIAMS, 2007; RODRIGUES *et al.*, 2007; KLIMCHOUK, 2015; DIMUCCIO, 2017; e referências neles incluídas). Para NICOD (1972) a solubilidade e permeabilidade são as duas propriedades fundamentais que estão na base das paisagens calcárias.

Nas situações mais clássicas, aproveitando a “*permeabilidade em grande*” (*sensu* MARTINS, 1949), por virtude de um sistema de fissuras<sup>4</sup>, as águas naturais meteóricas podem atuar, passando da superfície para o interior do maciço, através de processos de dissolução que alargam as descontinuidades e criam espaços vazios (cavidades<sup>5</sup>), no seu interior, e com tendência para a formação de bacias fechadas, à superfície (CUNHA, 1988).

No interior do maciço, uma hidrologia subterrânea incomum, cuja evolução é orientada pelo ciclo hidrológico (o “motor” da carsificação), utiliza uma complexa rede de condutas e fissuras. Sendo assim, as características distintivas do carso superficial (exocarso) também se encontram ao nível subterrâneo (cavidades no endocarso), representando o elemento particular/peculiar por relação a outras tipologias de paisagens naturais (FORD & WILLIAMS, 2007). Diferencia-se um carso epigénico, onde circulam águas de origem meteórica de forma não confinada (FORD & WILLIAMS, 2007), de um carso hipogénico, que se desenvolve em aquíferos em camadas, com sistemas de circulação dependentes da orientação da fracturação, a diferentes profundidades e com diferentes tipos de confinamento, podendo existir uma importante recarga profunda (KLIMCHOUK, 2015). O estudo do sistema subterrâneo de circulação de águas e a sua relação com a geologia (hidrogeologia), permite compreender melhor a formação de cavidades (espeleogénese) que, por sua vez, assume um papel

---

<sup>4</sup> Fissuras, designação que diz respeito a qualquer descontinuidade existente num corpo rochoso, podendo incluir falhas + diáclases (= fraturas) e os planos de estratificação. Representam os elementos do corpo rochoso mais suscetíveis de ser exploradas por processos de dissolução. Assumimos que falhas são fraturas com algum tipo de deslocamento da rocha, vertical e/ou horizontal. Falhas com deslocamento inferior a ~1 cm podem ser consideradas diáclases (FORD & WILLIAMS, 2007).

<sup>5</sup> Podendo algumas ser mesmo grutas: lapas ou algares, conforme o desenvolvimento principal seja horizontal ou vertical respetivamente (CUNHA, 1990; RODRIGUES *et al.*, 2007). No contexto do atual trabalho, com o termo gruta entende-se uma conduta, no maciço rochoso carbonatado, de dimensão suficiente para ser explorada pelo ser humano (SAURO, 1979; GILLIESON, 1996). Normalmente é a extensão de condutas subterrâneas que faz a conexão entre o carso superficial e o carso subterrâneo.

importante no entendimento geral do funcionamento cársico (KLIMCHOUK, 2007, 2015; VERESS, 2020).

O carso como paisagem natural pode-se desenvolver em rochas variadas, no entanto, é mais comum nas rochas carbonatadas que representam cerca de 20% da superfície dos continentes (FORD & WILLIAMS, 2007). Podemos ter um carso desenvolvido em rochas carbonatas (essencialmente calcários e dolomias), assim como em rochas evaporíticas (gesso e sal-gema). Para ANELLI (1975) e FORD & WILLIAMS (2007), designa-se por pseudocarso o tipo de carso desenvolvido em rochas que não são carbonatadas, mas com paisagens onde existem formas semelhantes às cársicas (tal como definidas no “Carso Clássico”). Estas formas podem ser originadas por processos de subsidência, ou em situações em que existe fusão de grandes quantidades de gelo (glaciocarso ou termocarso - SALOMON, 2000), ou mesmo em rochas vulcânicas em situações relacionadas com o escoamento de lava onde a consolidação de determinados fluxos origina cavidades subterrâneas (vulcanocarso) (FORD & WILLIAMS, 2007). Não obstante as considerações anteriores, o notável progresso dos estudos relacionados com a espeleogénese<sup>6</sup> originou um novo entendimento do conceito de carso, que se tornou mais dependente da dinâmica hidrogeológica, onde a mesma espeleogénese é percebida como o principal mecanismo de formação do carso (KLIMCHOUK, 2015).

Como já se referiu, as rochas carbonatadas parecem ser as mais importantes no desenvolvimento do carso, sendo solúveis nas águas naturais devido a serem constituídas, maioritariamente, por carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). O carbonato de cálcio é relativamente insolúvel em água pura, porém, quando as águas contêm dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), forma-se o ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), tornando o  $\text{CaCO}_3$  suscetível de dissolução acentuada (BÖGLI, 1960; WHITE, 1988; DREYBRODT *et al.*, 1996; FORD & WILLIAMS, 2007; entre outros). Em suma, esta reação química promove a passagem do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), relativamente insolúvel, a bicarbonato de cálcio [ $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ] solúvel.

Apesar do papel preponderante da dissolução na construção do modelado cársico, outros processos/mecanismos de meteorização, físicos e/ou biológicos, também intervêm (*e.g.*, fragmentação da rocha provocada por ciclos de gelo/degelo da água presente em diaclases; JENNINGS, 1985; SOARES, 1998/2001; DIMUCCIO, 2017). Como refere MARTINS (1949) sobre a génese das dolinas, “*Não há dúvida de que as dolinas sejam (...) geradas pela dissolução, embora se reconheça que, esboçada a dolina, a escorrência pode trabalhar – e trabalha – mecanicamente as paredes, contribuindo (...) para o alargamento da depressão*”.

---

<sup>6</sup> Neste âmbito, a espeleogénese é entendida como um processo hidrogeológico dinâmico de auto-organização da permeabilidade nos maciços líticos constituídos por rochas solúveis (KLIMCHOUK, 2015).

Sendo assim, a paisagem cársica caracteriza-se pela quase ausência de cursos de água superficiais permanentes, como consequência de um elevado grau de infiltração das águas meteóricas (perturbação, ao nível das soluções de continuidade, da rede de drenagem superficial), pela existência de depressões fechadas à superfície (como as dolinas), pela existência de rocha nua esculpida pela ação da dissolução das águas (como os lapiás), pelas exurgências localizadas normalmente nas bordaduras dos maciços, por uma paisagem subterrânea (endocarso), onde ocorrem cavidades (lapas e algares) que, por vezes, fazem parte de uma complexa rede de condutas percorridas pelas águas em fluxos geralmente rápidos (WHITE, 1988; FORD & WILLIAMS, 2007).

Existem vários fatores que influenciam a carsificação e o seu conhecimento pode permitir a avaliação do potencial endocársico, de forma sistemática, para um determinado território. De acordo com DIMUCCIO (2014) “[...] *Em termos das condições de suscetibilidade à carsificação de um maciço lítico carbonatado, estas decorrem (a) da capacidade do sistema hídrico para erodir (erosividade) e, (b) da resistência do corpo lítico em ser erodido (erodibilidade), ambos a diferenciar-se no espaço e no tempo*”. Esta suscetibilidade (entendida como a tendência para um determinado território em ser afetado por um determinado fenómeno), é determinada pelas características intrínsecas do relevo: litologia e características diagenéticas, estrutura geológica, presença ou não de uma cobertura detrítica insolúvel, morfologia do terreno (e.g., altimetria e declives), solo e coberto vegetal, comportamento hidrológico e hidrogeológico do sistema, etc.; pela ação dos fatores desencadeantes extrínsecos: precipitação, temperatura das águas que se infiltram no maciço; pelos fatores antrópicos: impermeabilização dos solos, transformação dos solos agrícolas/florestais, intensidade de exploração dos recursos hídricos, etc.

Face ao exposto no último parágrafo, salientamos, como exemplo, os resultados obtidos no trabalho desenvolvido por PAIVA (2014) para o Maciço de Sicó, localizado a norte da área de estudo. De facto, a aplicação de um modelo de análise multicritério em que se pretendeu elaborar um mapa com as áreas de recarga do hidrossistema cársico de Degraçias-Sicó, permitiu estabelecer algumas relações entre as características físicas do maciço, a configuração espacial das áreas de recarga e a forma como essa recarga se efetua. Ainda que o objetivo do referido trabalho seja bastante diferente do nosso, as variáveis utilizadas parecem estar em concordância com alguns dos fatores condicionantes da carsificação acima elencados. Neste modelo do Maciço de Sicó, verificou-se que as áreas de maior altitude, mais fraturadas, com maior densidade de formas cársicas (como algares) e com solos esqueléticos são as áreas preferenciais de infiltração das águas meteóricas, logo são áreas onde pode existir uma maior carsificação em profundidade.

### 3. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES RELATIVAS AOS FATORES CONDICIONANTES DA CARSIFICAÇÃO

#### 3.1. Litologia e litostratigrafia

A litologia influencia a carsificação pela suscetibilidade das rochas à dissolução e pela porosidade das mesmas, avaliada pela composição química-mineralógica e petrográfica dos seus constituintes. É expectável que as rochas com maior teor de carbonato de cálcio (ou outras substâncias solúveis) sejam mais suscetíveis à dissolução pelas águas (FORD & WILLIAMS, 2007). Num estudo de geomorfologia desenvolvido nas serras calcárias de Condeixa-Sicó-Alvaiázere (Maciço de Sicó) verificou-se que os calcários, calcários dolomíticos e calcários margosos têm comportamentos diferenciados à carsificação (CUNHA, 1988). Os últimos, com mais minerais argilosos, têm maior impermeabilidade e por isso são menos carsificáveis, já os primeiros com mais carbonato de cálcio (mais puros<sup>7</sup>) são mais carsificáveis. Na referida área, os calcários compactos do Jurássico Médio (mais puros e mais espessos) são o grupo litológico mais sensível à carsificação (CUNHA, 1988). De igual modo, em outro estudo, no Maciço Calcário Estremenho, CRISPIM (1995) concluiu que *“a formação calcária do Jurássico Médio é a formação cársica por excelência”*.

A maior parte das rochas carbonatadas consolidadas formaram-se em ambientes marinhos tropicais quentes e pouco profundos, com a acumulação a ocorrer em rampas e plataformas, resultando de processos bioquímicos que produzem carbonato de cálcio, combinando o cálcio dissolvido na água e o gás carbónico produzido pelo metabolismo dos organismos vivos (e.g., BURCHETTE & WRIGHT, 1992; FLÜGEL, 2004; MOORE & WADE, 2013 e referências neles incluídas). Os tipos de rochas que resultam deste processo estão relacionados com a abundância de determinados tipos de organismos e da produtividade do meio onde vivem. A dependência da atividade orgânica na acumulação e a sua propensão para alteração pós-deposicional, são características que distinguem estas rochas de outras rochas sedimentares. É estimado que o número de fácies carbonatadas possíveis é maior que todas as fácies existentes nas outras tipologias de rochas sedimentares.

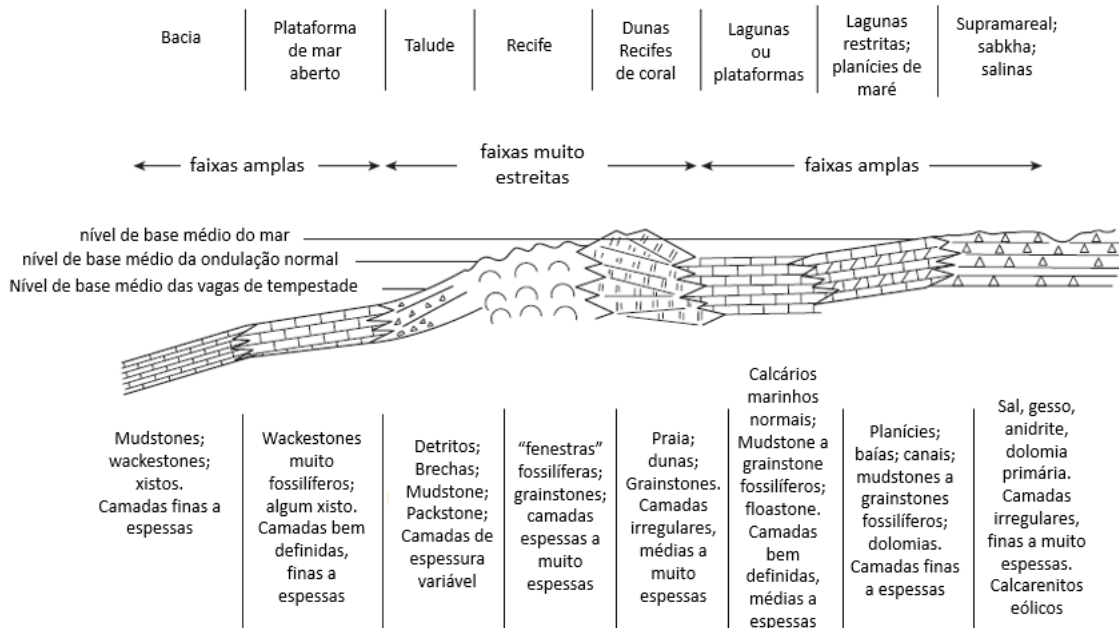
Os ambientes de deposição determinam em grande parte a pureza, textura, espessura das camadas e outras propriedades das sucessões sedimentares carbonatadas, originando assim diferentes litofácies, e determinando também, a designada porosidade primária (sistemas de espaços vazios presentes no sedimento após terminarem os processos deposicionais, ou seja, poros na matriz)<sup>8</sup> (FORD & WILLIAMS, 2007).

---

<sup>7</sup> FORD & WILLIAMS (2007) referem que as “melhores” rochas cársicas são compostas em mais de 70% por carbonatos.

<sup>8</sup> É pertinente ter em conta a noção de porosidade eficaz, que se refere aos espaços que são hidrologicamente interconectados. Considera-se a porosidade primária aquela que é criada durante a deposição da vasa carbonatada, sendo a

A Figura 2 representa, de forma generalizada e simplificada, vários ambientes deposicionais (existentes em plataforma ou rampa carbonatada) e os grupos de fácies carbonatadas associadas a calcários, dolomias e evaporitos. A grande variedade de fácies reflete a diversidade dos ambientes marinhos onde a atividade biológica é intensa. Esta complexidade difere da uniformidade da sedimentação dos grandes fundos que origina camadas bem definidas e espessas.



**Figura 2** - Modelo conceptual ilustrativo da deposição de calcários, dolomias e evaporitos. As faixas podem variar de alguns metros a alguns quilómetros de largura. No caso das faixas amplas, estas podem variar de alguns milhares de metros a mais de 100 quilómetros (adaptado de WILSON, 1974; FORD & WILLIAMS, 2007).

Os sedimentos acumulam-se em rampas e plataformas que irão subsidir ao longo do tempo. Se a acumulação local aumentar, a água e as fácies deposicionais são progressivamente mais rasas no sentido ascendente numa dada secção vertical, e vice-versa. À escala global, e numa forma muito generalista, longos períodos de atividade tectónica deformam as bacias oceânicas que, em conjunto com as variações climáticas (fases glaciares e interglaciares), levam a uma descida e subida do nível das águas do mar (variações eustáticas). Quando o nível do mar sobe ocorrem transgressões marinhas que originam fácies características de águas mais profundas (e.g., *mudstones* e *wackestones*), quando esse nível desce ocorrem regressões marinhas que originam fácies de águas rasas (e.g., *packstones* e *grainstones* fossilíferos) (FLÜGEL, 2004).

porosidade secundária originada pela diagénese após a sedimentação, e a porosidade terciária resultante do alargamento das fissuras por dissolução (FORD & WILLIAMS, 2007).

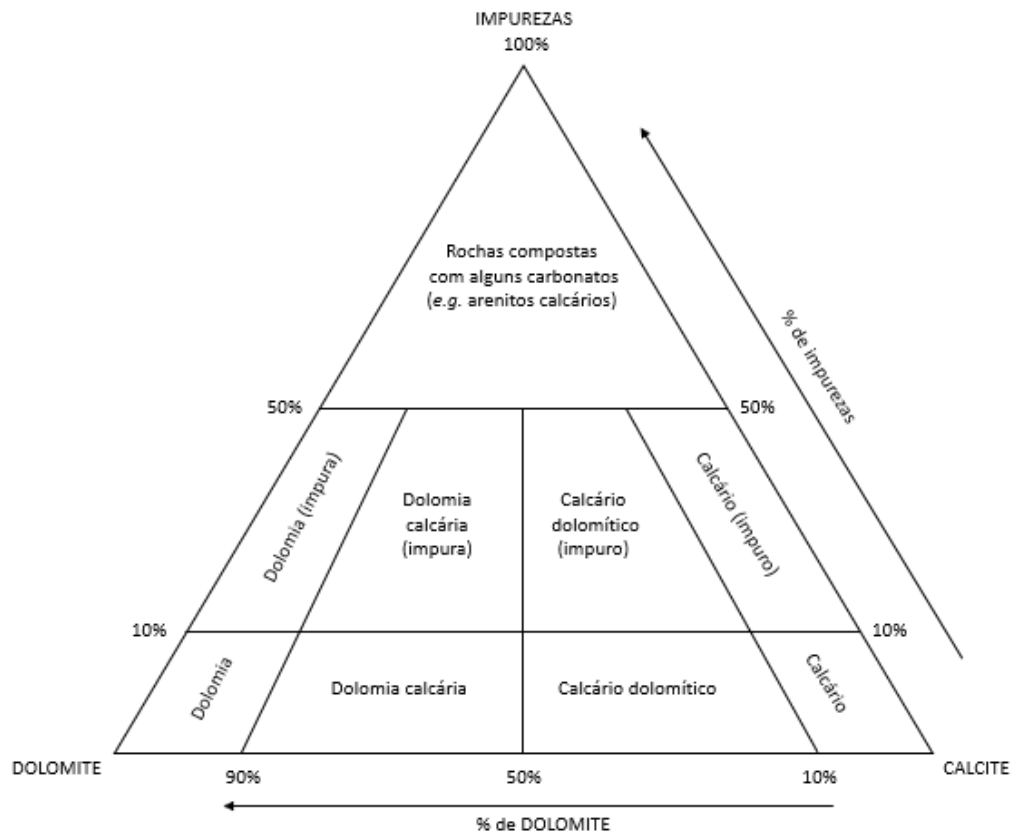


Podemos avaliar as rochas carbonatadas através do volume do tipo de minerais que as constituem (Figura 3), sendo que estas rochas possuem mais de 50% em minerais carbonatados. Os tipos mais comuns são os calcários, constituídos essencialmente pelos minerais calcite ou aragonite, e as dolomias<sup>9</sup>, constituídas essencialmente por dolomite. Considerando a percentagem de calcite relativamente à dolomite, rochas com mais de 90% de dolomite são dolomias, e rochas com mais de 90% de calcite são calcários (todas com menos de 10% de impurezas). Entre 10% a 50% de dolomite temos os termos intermédios de calcários dolomíticos e dolomias calcárias. Rochas carbonatadas com uma percentagem de impurezas superior ao 50% (*e.g.*, materiais detríticos ou outros materiais não carbonatados) identificam, por exemplo, face à relativa abundância de minerais argilosos em comparação com a calcite, as margas, as margas calcárias e os calcários margosos (WILSON, 1975; BOSELLINI *et al.*, 1989; FLÜGEL, 2004).

O grau de pureza das rochas carbonatadas é um importante fator no desenvolvimento de cavidades em ambiente cársico, sabendo, à partida, que a calcite é relativamente mais solúvel que a dolomite (WALTHAM, 1981; KLIMCHOUK *et al.*, 2000). Em muitos territórios cársicos, camadas ou horizontes dolomíticos reduzem ou impedem o desenvolvimento de cavidades em profundidade. Porém, também existem cavidades em rochas dolomíticas, normalmente associadas à preexistência de condutas mais desenvolvidas, maiores gradientes hidráulicos e longos períodos de dissolução. Em regra, a maior parte das cavidades desenvolvidas em rochas carbonatadas estão associadas a purezas superiores a 90%, para calcários e dolomias (KLIMCHOUK *et al.*, 2000).

---

<sup>9</sup> Alguns autores utilizam a designação dolomite indistintamente para indicar a rocha e o mineral, no entanto, para o presente trabalho, consideramos o termo dolomite para o mineral e dolomia para a rocha.



**Figura 3** - Classificação das rochas carbonatadas segundo LEIGHTON & PENDEXTER (1962), adaptado de FORD & WILLIAMS, (2007).

Os minerais argilosos e o quartzo são as impurezas insolúveis mais comuns nas rochas carbonatadas. Calcários com 20% a 30% de argila apenas permitem a formação de pequenas formas cársicas, já calcários com grãos de quartzo permitem a circulação da água de forma mais eficiente, logo pode existir uma maior dissolução nestes. Algumas cavidades bem desenvolvidas existem em arenitos calcários (FORD & WILLIAMS, 2007; KLIMCHOUK *et al.*, 2000). A presença de alguns metais, como o cobre, o manganês ou o chumbo também têm um efeito inibitório na dissolução da calcite. Já a presença de sulfatos, de ferro ou potássio, favorece a dissolução dos carbonatos (PEZDIČ *et al.*, 1998; FORD & WILLIAMS, 2007; PALMER, 2007, 2013; AULER, 2013; BARTON, 2013). O conhecimento do tipo de impurezas presentes nos calcários tem importância para a determinação da sua suscetibilidade à dissolução, porque apesar das mais extensas e mais desenvolvidas áreas cársicas ocorrerem em calcários relativamente puros, verifica-se que os calcários raramente são completamente puros (WHITE, 1988).

NOIREL *et al.* (2013) investigaram em laboratório os efeitos da dissolução em rochas carbonatadas com diferentes composições mineralógicas. Para uma amostra composta por cerca de 75% de carbonatos (essencialmente calcite) e 25% de silicatos (principalmente argilas, com uma pequena quantidade de quartzo), a dissolução dos carbonatos levou a um crescimento do revestimento de argila que atuou como uma barreira difusiva ao transporte de elementos através o revestimento de argila microporosa e logo a uma diminuição do processo de dissolução.

Não obstante as considerações acima expostas, existem sempre variações que não permitem associar unicamente uma maior ou menor propensão para a dissolução à pureza das rochas carbonatadas. Por exemplo, a calcite-alto-magnésiana e a aragonite são relativamente estáveis em contato com a água do mar, mas são facilmente solúveis em outras águas, sendo que a primeira é ainda mais solúvel que a segunda (PROTHERO & SCHWAB, 1996). Este comportamento deve-se à grande distorção da estrutura cristalina da calcite-alto-magnésiana. Verifica-se ainda que a calcite-baixo-magnésiana é menos solúvel que os outros dois minerais e só em seguida a calcite (JAMES & CHOQUETTE, 1984).

A classificação das rochas em categorias que, por sua vez, estão associadas às fácies carbonatadas, contribui para uma avaliação apriorística da sua porosidade e capacidade de dissolução e, conseqüentemente, do seu potencial de carsificação. A classificação de DUNHAM (1962), expandida por EMBRY & KLOVAN (1971), no Quadro 1, baseia-se em três critérios relacionados com a textura: a presença, ou não, de matriz microcristalina; a disposição dos grãos (contíguos ou não); a proporção relativa dos grãos. Distinguem-se assim, do ponto de vista textural, várias categorias de rochas (*e.g.*, *grainstone*, *packstone*, *wackstone*, *mudstone*, *boundstone*) indicativas da hidrodinâmica do meio em que foram formadas.

**Quadro 1** - Classificação textural de rochas carbonatadas [adaptado de DUNHAM (1962) e EMBRY & KLOVAN (1971) in SALOMON, 2000].

Estrutura reconhecível							Estrutura não reconhecível
Constituintes desconectados durante a deposição					Constituintes conectados		
Menos de 10% de grãos > 2 mm			Mais de 10% de grãos > 2 mm				
Presença de matriz microcristalina carbonatada (partículas < 0,03 mm)		Ausência de matriz microcristalina carbonatada		Grãos sem contacto	Grãos em contacto		
Grãos sem contacto		Grãos em contacto					
Menos de 10% de grãos	Mais de 10% de grãos						
<i>Mudstone</i>	<i>Wackstone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Grainstone</i>	<i>Floatstone</i>	<i>Rudstone</i>	<i>Boundstone</i>	Calcário recristalizado

Na análise das rochas carbonatadas também é comum a utilização da classificação composicional de FOLK (1959), que apresentamos na Figura 4. Esta classificação é baseada na proporção relativa entre matriz, grão e cimento, assim como na natureza dos grãos (intraclastos, partículas sem estrutura aparente e bioclastos). A matriz que liga esses grãos pode ser cristalina (esparite) ou microcristalina (micrite). A combinação de diferentes quantidades de micrite ou esparite, com diferentes tipos de grãos carbonatados, são indicadores da hidrodinâmica dos ambientes onde se formaram as rochas. Correntes de fundo marinho fracas estão associadas a grãos dispersos numa matriz micrítica, como as biomicrites ou oomicrites. Correntes de fundo mais fortes estão associadas a bioesparites, pelsparites ou intraesparites (FLÜGEL, 2004), que são equivalentes aos *packstones*, *grainstones* e *rudstones* de Dunham (Quadro 1), ainda que este autor não indique o tipo de grão (FORD & WILLIAMS, 2007).

Percent Allochems	Over 2/3 Lime Mud Matrix				Subequal Spar and Lime Mud	Over 2/3 Spar Cement		
	0 - 1 %	1 - 10 %	10 - 50 %	over 50%		Sorting poor	Sorting good	Rounded and abraded
Representative Rock Terms	Micrite	Fossil- iferous Micrite	Sparse Biomicroite	Packed Biomicroite	Poorly washed Biosparite	Unsorted Biosparite	Sorted Biosparite	Rounded Biosparite
1959 Terminology	Micrite	Fossil- iferous Micrite	Biomicroite		Biosparite			
Terrigenous Analogues	Claystone		Sandy Claystone	Clayey or Immature Sandstone	Submature Sandstone	Mature Sandstone	Supermature Sandstone	

Lime Mud Matrix     
 Sparry Calcite Matrix

Figura 4 - Classificação composicional de rochas carbonatadas de [FOLK (1959, 1962) In FLÜGEL, 2004]

Rochas com texturas mais finas (micríticas) são mais solúveis porque a área exposta à dissolução é superior. Em vários estudos realizados comprova-se que a micrite ou a biomicroite são mais solúveis, sendo que esta característica diminui bastante quando a matriz mais grosseira (esparite) representa 50% em volume (NOIRIEL *et al.*, 2013). No entanto, os calcários com grãos mais finos, e de grande uniformidade de tamanho dos minerais constituintes, são por vezes menos solúveis, sendo que a elevada compactação diminui a área de exposição à dissolução. Em regra, nos calcários, quanto maior é a heterogeneidade no tamanho das fases mineralógicas, maior é a rugosidade da superfície de dissolução, o que à partida aumenta a solubilidade da rocha. A biomicroite é mais solúvel que a micrite pura devido aos pequenos fragmentos fósseis que formam uma rugosidade nodosa (FORD & WILLIAMS, 2007).

RAUCH & WHITE (1970), num estudo sobre o papel da litologia no desenvolvimento de cavidades em rochas carbonatadas de Nittany Valley (Pensilvânia), confirmaram que o volume das cavidades existentes é superior em calcários mais puros e de textura mais fina. Em calcários dolomíticos e calcários com textura relativamente mais grosseira verifica-se que as cavidades são menos desenvolvidas.

Em grande parte, a maior ou menor suscetibilidade à dissolução das rochas carbonatadas deve-se ao seu tipo de porosidade (FORD & WILLIAMS, 2007). A heterogeneidade na porosidade primária e/ou secundária pode originar determinadas estruturas que, com a circulação da água, potenciam/orientam o início e o desenvolvimento de condutas (KLIMCHOUK *et al.*, 2000). Em rochas mais jovens a porosidade primária é geralmente forte (podendo estar entre 25% e 80%) e nas rochas mais antigas é

geralmente inferior a 1%, raramente superior a 2% porque são rochas mais cristalizadas (SALOMON, 2000; KLIMCHOUK *et al.*, 2000).

A avaliação do potencial de carsificação pode ser entendido à escala das unidades litostratigráficas - membros e formações (FORD & WILLIAMS, 2007). Muitas destas unidades, quando constituídas principalmente por camadas salinas ou gipsíferas (evaporíticas) podem existir sem mostrar grandes intercalações de materiais insolúveis (não carsificáveis) por dezenas, centenas ou mesmo milhares de metros de espessura. No entanto, é frequente que nas sucessões essencialmente calcárias e/ou calco-dolomíticas se reconhecem importantes interestratificações de camadas isoladas, ou corpos líticos (*i.e.*, constituídos por um ou mais estratos, por vezes amalgamados), insolúveis, tais como quartzarenitos, margas e pelitos/argilitos mais ou menos carbonosos, etc. (KLIMCHOUK *et al.*, 2000; FORD & WILLIAMS, 2007). Desta forma, não é fácil fazer generalizações relativas ao desenvolvimento da carsificação em sucessões carbonatadas estratigraficamente heterogéneas, além de que não é fácil distinguir, individualmente, os fatores favoráveis ao desenvolvimento das cavidades (WALTHAM, 1981). Verifica-se que as águas em profundidade circulam mais facilmente no contacto entre estratos mais calcários e outros relativamente mais impermeáveis (*e.g.*, margas ou pelitos/argilitos), aproveitando os planos de estratificação ou mesmo a presença de juntas de estratificação, o que pode originar um sistema de condutas independente ou fracamente conectado (KLIMCHOUK *et al.*, 2000; FORD & WILLIAMS, 2007).

Neste contexto, torna-se claro que a litostratigrafia, estudo da organização das camadas rochosas (estratos), com base nas suas características litológicas, faciológicas e estratonómicas (MOORE, 2013), afigura-se de grande importância para o entendimento de algumas condicionantes ao desenvolvimento de cavidades cársicas. No entanto, será sempre preciso ter em conta que as unidades líticas reconhecidas e cartografadas numa determinada sucessão estratigráfica exprimem, muita vez, uma representação média de análogos estratos que se empilham, podendo ser verticalmente e lateralmente heterogéneas com uma alternância (por vezes cíclica) de camadas com características bastante distintas mas com espessura demasiado reduzida para serem evidenciadas num mapa ou mesmo numa coluna estratigráfica. No contexto da espeleogénese, estes estratos que existem em pequenas proporções nas sucessões carbonatadas, tanto em termos de espessura como de frequência, podem ser tão importantes quanto os estratos mais espessos e comuns que as rodeiam. Para além disso, em litostratigrafia os limites das formações e dos membros normalmente correspondem a superfícies de descontinuidades bem marcadas e lateralmente contínuas, materializadas por planos ou juntas de estratificação, superfícies que patenteiam evidências de *hardgrounds* ou mesmo por superfícies erosivas mais ou menos pronunciadas: devido a serem anteriormente ocupados por rochas

não carbonatadas mais suscetíveis à erosão; por carsificação da rocha inferior logo após a deposição, antes de camadas mais espessas serem depositadas; pela maior propensão a carsificação da rocha adjacente, do que as rochas acima e abaixo (KLIMCHOUK *et al.*, 2000).

Muitos planos de estratificação representam intervalos de tempo coincidentes com o momento em que um ciclo de deposição termina e outro começa. No caso das juntas de estratificação, esses intervalos podem coincidir com a deposição de finas camadas ricas em argila, paleossolos ou crostas endurecidas (calcretas). A uma sobreposição dos sedimentos do ciclo seguinte existe uma exposição que pode originar superfícies de erosão por dissolução (ciclos A e C na Figura 5), ou camadas finas compactas. Após o enterro, estas superfícies representam descontinuidades na sucessão carbonatada que favorecem a circulação da água e o consequente desenvolvimento de cavidades (KLIMCHOUK *et al.*, 2000; FORD & WILLIAMS, 2007). Superfícies de *hardground*, localizadas no fundo do mar, desenvolvem-se em *grainstones* e *packstones* com o abrandamento ou paragem da sedimentação, permitindo alguma dissolução e precipitação de calcite (ciclo B na Figura 5). Estas superfícies também representam estruturas preferenciais para uma posterior carsificação (FORD & WILLIAMS, 2007).

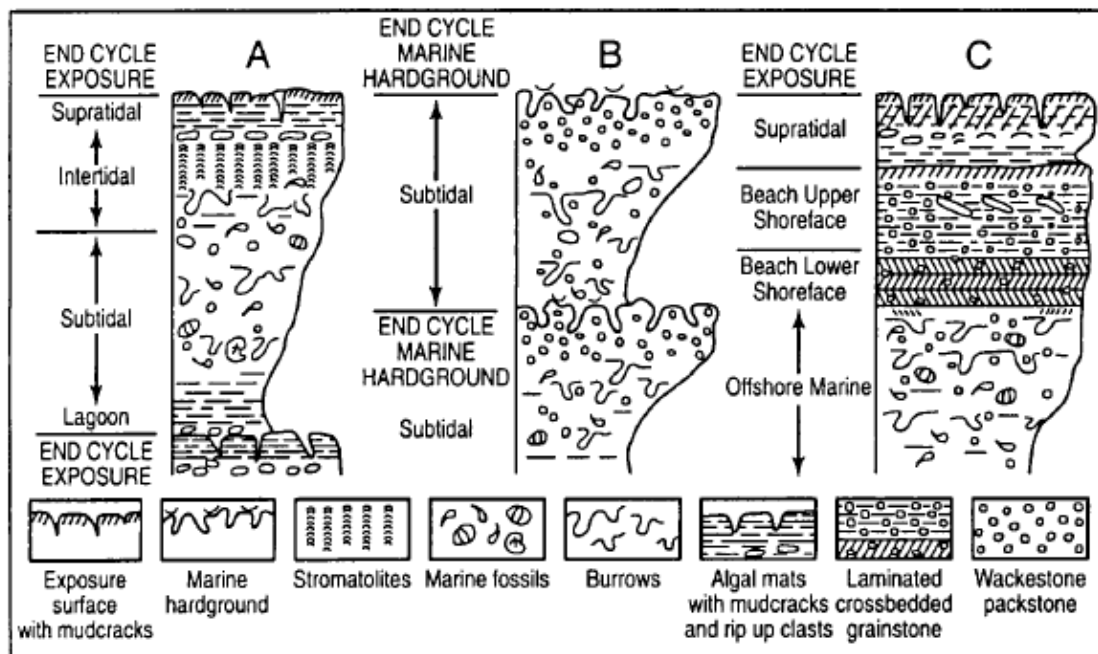


Figura 5 - Modelos conceituais de sucessões carbonatadas de águas rasas mais comuns (MOORE, 2001).

## 3.2. Estrutura geológica

### 3.2.1. Geometria das camadas rochosas

O desenvolvimento de formas endocársicas depende muito das condições estruturais do maciço, nomeadamente da geometria dos estratos e da fraturação (tratada no subcapítulo seguinte). As ações que decorrem das causas que modificam a atitude (geometria) da estratificação, ligadas essencialmente a movimentações tectónicas, importantes a todas as escalas (desde a meso até à macro) podem ter uma grande influência na circulação dos fluidos em profundidade e, desta forma, condicionar os processos de carsificação (WALTHAM, 1981; KLIMCHOUK *et al.*, 2000; SALOMON, 2000; FORD & WILLIAMS, 2007).

Segundo WALTHAM (1981), os padrões de desenvolvimento das cavidades estão sobretudo relacionados com os parâmetros topográficos e hidrológicos, sendo que a geologia controla apenas os detalhes. São exceções significativas as variações na frequência de diaclases e a existência de camadas mais impermeáveis na sucessão carbonatada.

Já para PALMER (1989), a simples avaliação do mapa das cavidades leva-nos a sobrestimar a importância da topografia e da drenagem à superfície - o movimento das águas subterrâneas é controlado muito mais pela estrutura geológica. Os padrões de desenvolvimento das cavidades refletem em grande detalhe as estruturas geológicas que controlam a génese das cavidades pelas águas subterrâneas (ver desenvolvimento da cavidade MR, na Figura 6).

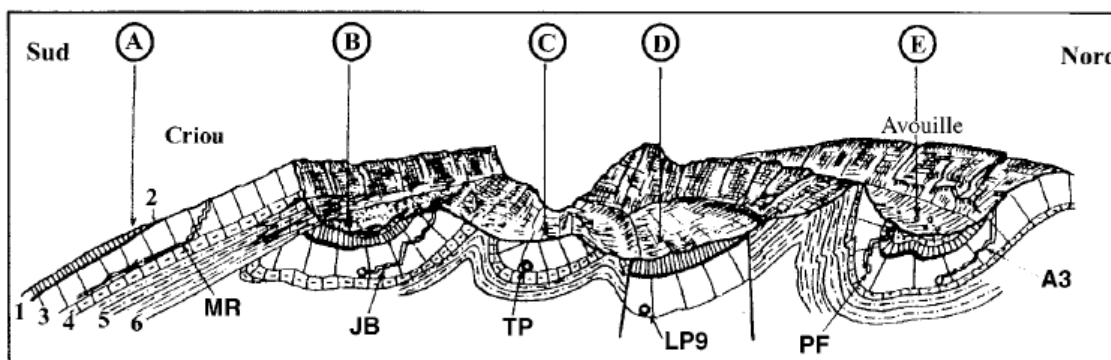
Os terrenos cársicos englobam quase todos os tipos e extensões de estruturas geológicas<sup>10</sup>, incluem planícies e planaltos com estratos horizontais ou subhorizontais, monoclinais pouco e muito inclinados, dobras, domos diapíricos, falhas, etc. Estruturas dobradas estão associadas a deformações plásticas, normalmente formadas por estratos diageneticamente mais maduros. Dobras maiores tendem a estender-se por vários quilómetros ao longo da superfície axial, onde as tensões mecânicas tendem a formar fraturas paralelas às cristas dos anticlinais e aos vales sinclinais. Surgem cavidades em alguns anticlinais e sinclinais e é mais comum encontrar cavidades nos vales sinclinais (Figura 6). No entanto, existem também vários exemplos em que as maiores cavidades se desenvolvem em torno do sector mais elevado de um anticlinal com o eixo inclinado (FORD & WILLIAMS, 2007). Em estruturas de grande extensão, um sinclinal tende a capturar as cavidades quando a carsificação é controlada pelas características estratigráficas, como, por exemplo, em sinclinais onde a drenagem se efetua em

---

<sup>10</sup> A estrutura geológica é aqui entendida no seu todo, onde se conjugam as ações que decorrem das causas que dirigem o processo de sedimentação (*e.g.*, a formação de juntas de estratificação), juntamente com as que modificam a atitude (geometria) da estratificação ligada essencialmente a movimentações tectónicas (DIMUCCIO, 2014).



cavidades inicialmente formadas na zona vadosa<sup>11</sup> estando associadas à presença de uma camada mais impermeável (e.g., margas) (WALTHAM, 1981).



**Figura 6** - Desenvolvimento cárstico em estruturas geológicas complexas dos Alpes franceses, em Samoens. Os números identificam as unidades do Cretáceo Inferior (6) ao Cretáceo Médio (1). Ao número 3 corresponde a unidade carsificada principal. As letras identificam estruturas geológicas individuais, tais como monoclinais e sinclinais. Réseau Mirola (MR) e Réseau Jean Bernard (JB) são entre as cavidades mais exploradas e profundas do mundo. TP, LP9, PF e A3 são proeminentes exurgências ou sistemas de algares nas outras estruturas (adaptado de FORD & WILLIAMS, 2007).

Onde as camadas ou conjunto de camadas carsificadas se encontram interestratificadas com estratos siliciclásticos, inclinados e dobrados, frequentemente criam-se condições de confinamento artesiano. As águas meteóricas de recarga, confinadas entre rochas mais impermeáveis, podem demorar muito tempo antes de alcançarem as exurgências (FORD & WILLIAMS, 2007), existindo assim um maior potencial de dissolução das camadas relativamente mais solúveis.

Verifica-se que onde os estratos da sucessão carbonatada são horizontais ou pouco inclinados há um maior desenvolvimento de cavidades cársticas (WHITE, 1988; FORD & WILLIAMS, 2007), sendo que estas têm maior propensão para se estenderem horizontalmente em duas ou mais dimensões. Nestas condições desenvolvem-se sistemas de drenagem complexos devido à possibilidade de existência de muitas condutas tributárias, sobretudo quando interessam o mesmo plano de estratificação. A maior parte das cavidades existentes no leste dos Estados Unidos (e.g., *Mammoth Cave Region – Kentucky* ou *West Virginia Karst*) desenvolveram-se em estratos calcários muito espessos e com inclinação próxima da horizontal (WHITE, 1988). A propósito de um estudo na *Mammoth Cave Region*, PALMER (1989) considera que entendendo o processo de carsificação na sua globalidade, o desenvolvimento

<sup>11</sup> A água infiltra-se no maciço rochoso a partir da superfície até ao aquífero subjacente, movimentando-se verticalmente sob a influência da gravidade através de fissuras e condutas, até que atinge um nível onde todas as cavidades estão totalmente preenchidas com água (zona saturada). A superfície sazonal que separa a zona saturada com a zona que contém cavidades com espaços vazios, designa-se de toalha freática. A zona abaixo da toalha freática denomina-se de zona freática e a zona acima desta, que não se encontra saturada, zona vadosa (WHITE, 1988). Do ponto de vista hidrológico podemos dizer, em última análise, que as funções do epicarso (zona mais próxima da superfície topográfica) são de armazenamento e concentração das águas meteóricas enquanto estas percolam para a zona vadosa (FORD & WILLIAMS, 2007).

de cavidades em camadas calcárias quase horizontais, no centro-leste dos Estados Unidos, é normalmente considerado como de fácil entendimento/explicação. No entanto, numa avaliação mais cuidada, verifica-se que a influência da geologia nessas cavidades é um pouco mais complexa, tal como as explicações consideradas para as regiões intensamente deformadas.

No Quadro 2 apresentamos uma classificação estratonómica onde se identifica a espessura das camadas (entre planos de estratificação) e o espaçamento das diaclases em situações que permitem a passagem das águas em profundidade (KLIMCHOUK *et al.*, 2000; FORD & WILLIAMS, 2007).

**Quadro 2** - Terminologia utilizada para a espessura das camadas e o espaçamento das diaclases (adaptado de FORD & WILLIAMS, 2007).

Espessura da camada (cm)	Descrição	Espaçamento da diaclase (cm)	Descrição
100 - 1000	<i>Grande e muito grande espessura</i>	> 300	<i>Muito larga</i>
30 - 100	<i>Espessa</i>	100 - 300	<i>Larga</i>
10 - 30	<i>Média</i>	30 - 100	<i>Média</i>
3 - 10	<i>Fina</i>	5 - 30	<i>Apertada</i>
1 - 3	<i>Muito fina</i>	< 5	<i>Muito apertada</i>
< 1.0	<i>Laminada</i>		

A extensão de planos de estratificação, por vezes associados a juntas de estratificação, e que permitem a passagem das águas, é muito variável. Onde as camadas são muito finas a finas, esses planos cobrem uma área de apenas alguns metros quadrados. Onde as camadas possuem espessura média a espessa, os planos de estratificação estendem-se por  $10^3$  a  $10^6$  m<sup>2</sup> ou muito mais. Por vezes, os planos de estratificação podem acompanhar uma unidade por centenas de quilómetros, criando condições favoráveis à formação de cavidades por dissolução. As situações mais favoráveis ao desenvolvimento de cavidades verificam-se nas camadas de espessura média a muito grande (Quadro 2), pois geralmente possuem uma maior energia potencial. Em camadas mais finas o ataque da dissolução é mais disperso. Estas camadas mais finas também não possuem a força mecânica necessária para a criação de espaços abertos sem colapsar (KLIMCHOUK *et al.*, 2000; FORD & WILLIAMS, 2007).

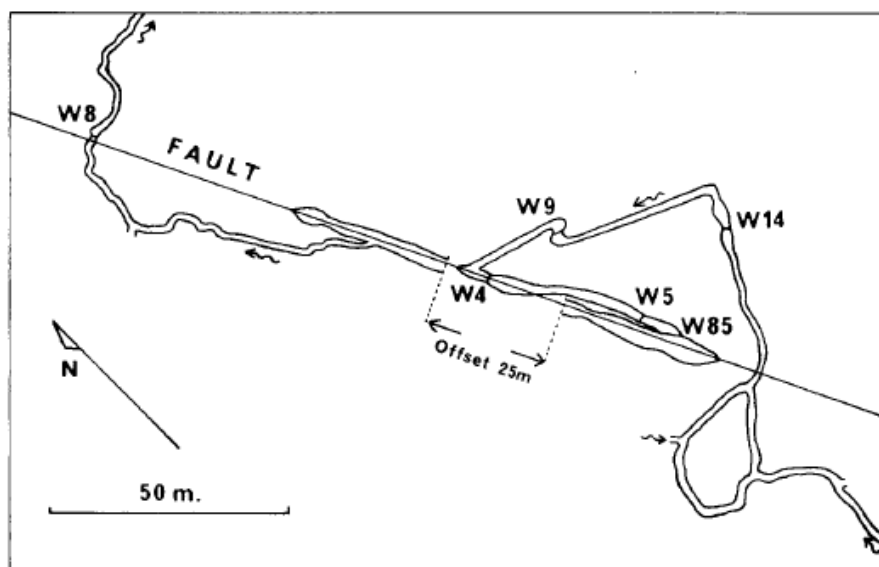
A estrutura geológica, no que respeita à disposição/geometria das camadas, parece assumir um importante controlo sobre a carsificação do maciço rochoso, nomeadamente na forma como se processa a circulação/permanência das águas em profundidade. No subcapítulo 6.2.1 são ponderadas algumas características da geometria das camadas na avaliação da suscetibilidade à carsificação das unidades litostratigráficas.

### 3.2.2. Fraturação

Assim como já se referiu, a circulação das águas no interior do maciço rochoso ocorre muito devido à existência de descontinuidades associadas à fraturação (falhas e diaclases). Segundo CUNHA (1988), a disposição das camadas calcárias e o seu grau de fraturação condicionam o modo como as águas se infiltram no maciço calcário, assumindo assim um papel importante no desenvolvimento do carso em profundidade. Os trabalhos realizados por VARGAS *et al.* (2003) e MORADI *et al.* (2016), com a intenção de definir e cartografar áreas mais suscetíveis à carsificação, mostraram que a fraturação assume grande relevância na intensidade da carsificação e no desenvolvimento do endocarso. Para FORD & WILLIAMS (2007), as fissuras (= fraturas + planos de estratificação) são de grande importância, porque potenciam e orientam o desenvolvimento da maior parte da rede de condutas subterrâneas, aspeto que distingue o carso dos restantes sistemas naturais. A existência de fissuras facilita a circulação da água no corpo rochoso (porosidade secundária) e contribui para o alargamento das mesmas por via da dissolução, construindo-se condutas que facilitam ainda mais a circulação da água (porosidade terciária).

As falhas representam deslocamentos significativos da rocha, verticais, laterais ou inclinados, e são sectores planares preferenciais para a infiltração das águas meteóricas ou para a subida das águas profundas. Os deslocamentos verticais podem acontecer na ordem das dezenas ou centenas de metros e podem afetar áreas com quilómetros de extensão. Esses deslocamentos também podem rejogar várias vezes ao longo do tempo geológico e formar aberturas a grandes profundidades, no entanto, podem estar preenchidas com brechas, remobilizações das coberturas superficiais essencialmente siliciclásticas ou mesmo por calcite espática de precipitação. As falhas de cavalgamento são importantes para a carsificação porque representam falhas inversas com o plano de falha com fraca inclinação e de grande extensão, sendo que este plano revela-se ser uma superfície favorável à instalação de uma rede de condutas de dissolução. As falhas principais raramente se encontram isoladas, é comum serem intersectadas por falhas ou diaclases menores, que formam ângulos agudos com as primeiras como consequência da torção da rocha (aumentando assim a densidade da fraturação). Estas são por vezes detetáveis através de fotografias aéreas ou imagens de satélite e normalmente designadas como traços superficiais de fratura ou lineamentos (KLIMCHOUK *et al.*, 2000; FORD & WILLIAMS, 2007). Os lineamentos, identificáveis na paisagem, podem ser expressão da estrutura geológica subjacente, ser indicativos da existência de fraturas (*e.g.*, falhas) ou de outro tipo de descontinuidades (GOMES, 2008; MORADI *et al.*, 2016), representando potenciais zonas preferenciais para a carsificação do maciço rochoso.

O papel das fraturas na espeleogénese varia em função do seu tipo, tamanho e evolução diagenética desde que foram formadas. DUBLYANSKY & KIKNADZE (1983) verificaram que existe grande permeabilidade nas áreas de maior densidade de fraturação (identificada como lineamentos à superfície), em torno de uma falha principal. Em muitas cavidades os planos de falha apenas condicionam segmentos de passagem locais (Figura 7), sendo que a orientação geral de desenvolvimento das cavidades é condicionada pela distribuição espacial das diáclases (WALTHAM, 1981; KLIMCHOUK *et al.*, 2000; FORD & WILLIAMS, 2007).



**Figura 7** - Orientação e desenvolvimento de uma cavidade em torno de uma falha principal em Black Shiver Pot, Yorkshire (WALTHAM, 1981).

A distribuição da fraturação também pode ser analisada do ponto de vista da estratigrafia, onde procuramos estabelecer correlações entre a distribuição das fraturas e as características litostratigráficas de uma determinada sucessão carbonatada. Verifica-se que o espaçamento médio das fraturas, numa camada rochosa, é em regra, inversamente proporcional à espessura da camada (ver o quadro 2), com a frequência de fraturas a aumentar nas camadas mais finas. No entanto, devemos também ter em conta as características mecânicas (estratigrafia mecânica) das camadas (e.g., DIMUCCIO, 2014; DIMUCCIO & CUNHA, 2020). A propagação vertical de fraturas interestratos pode ser inibida nas camadas mais frágeis pela existência de camadas relativamente espessas e menos frágeis. Uma sequência de camadas pode influenciar a propagação vertical da fraturação como se tratasse de uma camada de determinadas características mecânicas. Os planos de estratificação podem também influenciar a fraturação, em camadas de resistência mecânica diferente, pelo que a propagação vertical da fraturação tende a parar nos planos de estratificação. Em regra, o espaçamento das fraturas intraestrato é mais regular, enquanto o espaçamento e comprimento das fraturas

interestrato é mais irregular. De referir ainda a composição das rochas que pode originar anisotropia na propagação da fraturação, como é o caso das rochas carbonatas mais fossilíferas onde a percentagem da fraturação tende a diminuir com o aumento da frequência de bioclastos (PEACOCK & MANN, 2005; e referências neles incluídas).

Em estudo realizado por AFSAR *et al.* (2014), numa sucessão carbonatada com alternância de calcários e margas, a distribuição de fraturas varia de forma significativa apesar da espessura das camadas ser idêntica. Verificou-se que existiam mais fraturas interestrato nas camadas calcárias bem estratificadas do que nas camadas com características seminodulares (lateralmente irregulares). Ainda no mesmo estudo, verificou-se que as fraturas interestratos são mais frequentes quanto mais puros forem os calcários.

Não obstante as considerações explanadas nos dois últimos parágrafos, LAUBACH *et al.* (2009) consideram que para uma previsão precisa da fraturação, em condições estruturais e diagenéticas complexas, necessitamos antes de uma caracterização completa das unidades litostratigráficas, nomeadamente das suas características mecânicas.

Numa perspetiva da fraturação à escala regional, EKMEKÇ (2003) verificou, no carso turco, que a distribuição espacial de diferentes tipos de carso é coincidente com o mapa tectónico. Os processos de carsificação estão relacionados com a evolução tectónica, considerando que a neotectónica (através do levantamento do maciço rochoso), fornece o “gradiente energético” necessário ao desenvolvimento do carso. Distingue um “carso evolucionário”, caracterizado por uma carsificação contínua no tempo, de um “carso rejuvenescido”, resultante de uma reativação da carsificação, sendo esta devida a movimentos tectónicos ou descida rápida do nível base, fatores conjugados com condições paleogeográficas específicas (*e.g.*, o clima).

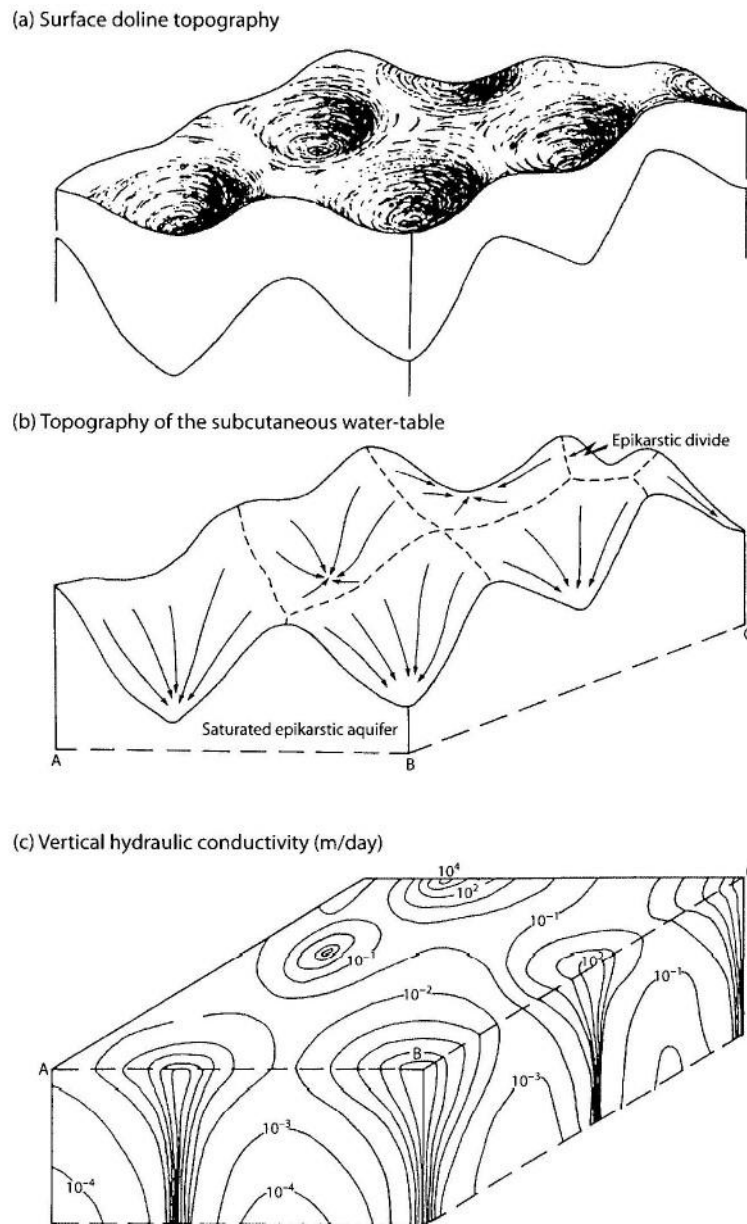
Constatamos que uma maior densidade de fraturação contribui para uma maior facilidade de circulação das águas meteóricas no maciço rochoso (aspeto a tratar no subcapítulo 6.2.2), sendo que as falhas e as diaclases podem, com maior probabilidade, orientar o desenvolvimento das cavidades subterrâneas. Por outro lado, a distribuição das fraturas na sucessão estratigráfica também dependente, em parte, da espessura das camadas. Este último aspeto é, de certa forma, tido em conta na avaliação da suscetibilidade à carsificação das unidades litostratigráficas (subcapítulo 6.2.1), no que diz respeito à estratonomia e geometria das camadas.

### 3.3. Topografia

Além da importância da estrutura geológica para a diferenciação espacial da carsificação e para a orientação do desenvolvimento das cavidades, existem algumas características do relevo (*e.g.*, declive, altitude e forma das vertentes) que contribuem também para determinar a maior ou menor propensão à carsificação do maciço rochoso.

Aspetos particulares da topografia definem a forma como se faz a circulação e concentração das águas superficiais, assim como a velocidade de escoamento (CUNHA, 1988). A diferença altimétrica, entre as áreas de recarga (*e.g.*, sumidouros) e as áreas de descarga (exurgências), influencia diretamente o potencial endocársico. Essa diferença traduz-se no soerguimento do maciço face ao nível de base local que comanda a drenagem da área. Deste modo, quanto maior esse soerguimento, maior o gradiente hidráulico e, logo, maior é o desenvolvimento potencial do carso, nomeadamente do carso subterrâneo (MORADI *et al.*, 2016). A circulação das águas através do maciço rochoso é possível devido à existência de uma força motriz, determinada pela gravidade e pelo desnível. Quanto maior a diferença altimétrica acima referida, maior a força motriz e a intensidade hidrodinâmica, o que aumenta também o potencial de erosão mecânica no contexto da porosidade terciária (SALOMON, 2000). No que respeita ao declive, considera-se que as áreas com menor declive representam áreas de maior infiltração e de maior recarga do sistema, por isso são áreas com potencial endocársico mais elevado (VARGAS *et al.*, 2003; MORADI *et al.*, 2016).

Devemos avaliar também a importância da topografia na concentração do escoamento das águas superficiais, tendo sempre em conta uma das principais características do relevo cársico - a quase ausência de escoamento superficial (WHITE, 1988; SALOMON, 2000; FORD & WILLIAMS, 2007). Nas superfícies onde afloram calcários, normalmente, as possibilidades de escoamento e concentração das águas superficiais estão limitadas. A grande abundância de fissuras perto da superfície origina uma recarga predominantemente difusa, mesmo em áreas com dolinas bem desenvolvidas. Nestas, o escoamento superficial é geralmente negligenciável e a concentração da circulação realiza-se através do epicarso em redes de drenagem organizadas em função das maiores fissuras de origem tectónica que, por sua vez, funcionam como rotas de drenagem para o resto da zona vadosa (Figura 8). As dolinas parecem ser mais o resultado da concentração dos fluxos e da espeleogénese na base da zona epicársica, do que verdadeiramente uma via de concentração e uma condução do escoamento superficial (KLIMCHOUK *et al.*, 2000).



**Figura 8** - Superfície topográfica associada às dolinas (A); Relação da topografia com a toalha freática da zona epicársica (B); Condutividade hidráulica próxima da base da zona epicársica (C) (WILLIAMS (2008)).

Verifica-se, porém, que a topografia acima das exurgências assume sempre um papel importante na carsificação, pois as maiores cavidades desenvolvidas na zona vadosa localizam-se em áreas montanhosas (SALOMON, 2000; FORD & WILLIAMS, 2007).



Face ao acima exposto, para além do declive, a noção de energia do relevo, entendida como a diferença entre as altitudes máxima e mínima numa área pertencente a uma grelha regular (*e.g.*, 1 Km<sup>2</sup>) (BAIONI & TRAMONTANA, 2017), apresenta-se como um indicador pertinente para a avaliação da importância da topografia na carsificação. Neste âmbito, a topografia é entendida como força motriz para o desenvolvimento da carsificação (SEIF & EBRAHIMI, 2014).

A “topografia de dissolução” existente no carso é também modelada pela quantidade e velocidade a que as águas meteóricas se infiltram no maciço rochoso. A diferença altimétrica registada em determinadas áreas, ou seja, a energia do relevo, assume-se aqui como um pertinente indicador para avaliar a topografia como fator condicionante da carsificação (subcapítulo 6.2.3).

### **3.4. Ocupação do solo**

A topografia que caracteriza as regiões cársicas geralmente origina uma paisagem pedregosa solidária com a rápida infiltração das águas no maciço rochoso fissurado. Em determinadas situações, coberturas detriticas siliciclásticas poligénicas, como são exemplos os chamados Depósitos Poligénicos Vermelhos<sup>12</sup> identificados no Maciço de Sicó (CUNHA, 1988), atapetam as depressões fechadas. A vegetação esclerófila ou a existência de alguma cobertura detritica disfarçam a presença generalizada de rocha nua (MARTINS, 1949).

A eventual existência de uma cobertura de solos e vegetação influencia tanto a forma como as águas se infiltram como as suas propriedades químicas. Os solos e a vegetação (ainda que, em regra, relativamente escassos e descontínuos) contribuem também para o processo de carsificação, pois provocam a acidificação das águas por incorporação de ácidos orgânicos, tornando-as mais agressivas sobre as rochas carbonatadas (JAMES & CHOQUETTE, 1984; TRUDGIL, 1985). O próprio ar, existente nos solos, tem uma pressão superior de CO<sub>2</sub>, comparativamente à da atmosfera, devido à respiração das plantas e à transformação da matéria orgânica. Conforme as águas meteóricas percolam através do solo, a adição de CO<sub>2</sub> de origem orgânica aumenta a quantidade de CO<sub>2</sub> (JAMES & CHOQUETTE, 1984). A zona vadosa é, assim, dominada pela infiltração de águas agressivas do epicarso, relacionadas com a intensa atividade orgânica que originam processos de corrosão física e química/biológica (Figura 9) (ESTEBAN & KLAPPA, 1983).

---

<sup>12</sup> Depósitos com origem na remobilização de coberturas siliciclásticas com “*terra rossa*” (CUNHA, 1988).



A hipótese de a erosão química aumentar devido à acidificação das águas pelo solo é geralmente aceite pelos vários autores, mas depende do seu grau de desenvolvimento e do seu comportamento ao nível da drenagem. Através de observações de campo verificou-se que em solos ácidos (com baixo teor em carbonato de cálcio) existe maior potencial de meteorização e maior capacidade de drenagem das águas meteóricas. Assim, quanto mais desenvolvidos forem estes solos, maior a acidificação das águas aquando da sua percolação através do solo. Verifica-se ainda que as condutas subjacentes aos solos ácidos são propensas a um maior alargamento. Já nos solos alcalinos, com elevado teor em carbonato de cálcio, existe uma circulação das águas mais difusa que leva a uma maior generalização espacial da capacidade de dissolução, ainda que a agressividade das águas seja menor devido à sua saturação. Este fenómeno ocorre porque existe a dissolução imediata do carbonato de cálcio, presente em grande quantidade, que limita a percolação das águas (TRUDGILL, 1985).

O coberto vegetal controla, também, a infiltração das águas no maciço rochoso. As áreas de vegetação mais densa tendem a atrasar a infiltração, levando a uma percolação mais lenta das águas e ao incremento da dissolução (MORADI *et al.*, 2016). ZHONG (2011) avaliou a taxa de dissolução de rochas carbonadas em diferentes usos do solo numa área do sul da China. Verificou que a taxa de dissolução mais elevada ocorre em áreas de floresta e que alterações na ocupação do solo podem aumentar bastante a taxa de dissolução. Por exemplo, a dissolução é três vezes superior numa floresta primária do que numa área reflorestada, e nove vezes superior a uma área arbustiva. Áreas ocupadas por pastagens apresentam uma taxa de dissolução superior às áreas arbustivas e às áreas cultivadas.

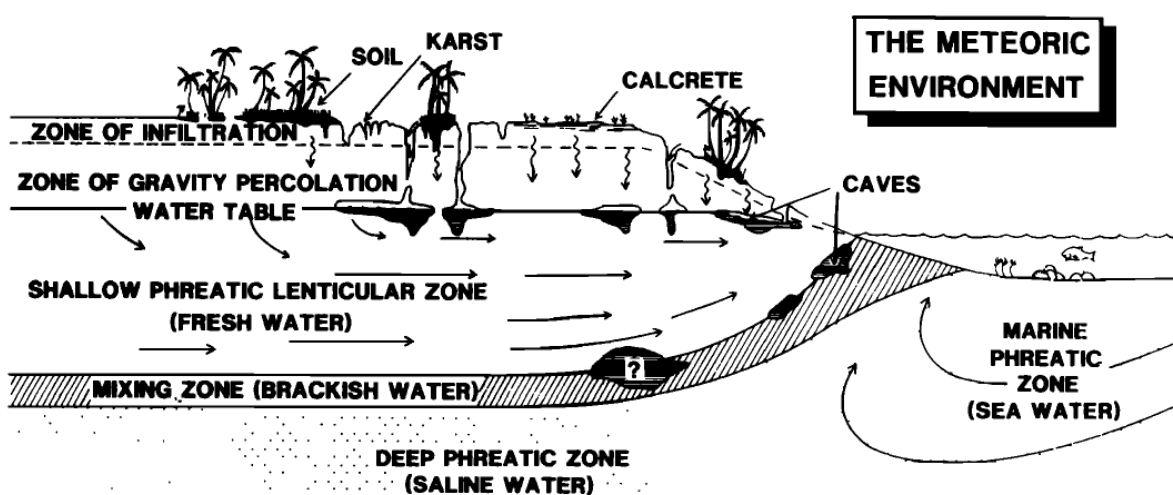


Figura 9 - Principais zonas do ambiente diagenético meteorico (JAMES & CHOQUETTE, 1984).

A existência de uma cobertura detrítica, de solo e o tipo de vegetação podem influenciar o potencial endocársico na medida em que incrementam o poder de dissolução das águas meteóricas. Por outro lado, a inexistência de solo facilita a infiltração dessas águas. O modo como este fator condicionante da carsificação é avaliado encontra-se no subcapítulo (6.2.4).

Face ao exposto, importa agora definir como devemos considerar os fatores condicionantes da carsificação subterrânea na construção do modelo de potencial endocársico (Figura 1). A quantidade e o tipo de informação existente sobre a área de estudo condicionam de alguma forma o nível de detalhe (escalas) com que conseguimos avaliar estes fatores.

Assim sendo, para a construção do referido modelo foram considerados os seguintes fatores e respetivos elementos intrínsecos avaliados (quando aplicável): (1) as unidades litostratigráficas, onde se avaliam a litologia, o tipo de fácies, a granulometria, a textura, a estratonomia e a porosidade primária aparente; (2) a estrutura geológica, onde se avaliam a geometria das camadas e a densidade da fraturação; (3) a topografia, através da energia do relevo; e (4) a ocupação do solo.

#### 4. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO DA ÁREA DE ESTUDO

Com 54 Km<sup>2</sup>, a área de estudo localiza-se numa área pertencente ao Concelho de Porto de Mós, que também está integrada no PNSAC. Enquadra-se, portanto, no designado Maciço Calcário Estremenho e abrange grande parte do Planalto de Santo António, no seu sector norte. Inclui parte das depressões da Mendiga (a W) e de Alvados (a E), do vale tifónico de Rio Maior-Porto de Mós, dos vales dos rios Alcaide e Lena (a N) e da parte setentrional da Serra dos Candeeiros (a NW). Integra-se nas folhas 308 (Porto de Mós) e 318 (Mira de Aire) da cartografia militar, à escala 1:25 000 (série M888), e na folha 27-A (Vila Nova de Ourém) da Cartografia Geológica de Portugal, à escala 1:50 000 (Figura 10). As primeiras cabeceiras de montante do Rio Lena e do seu afluente Rio Alcaide localizam-se no sector setentrional da área de estudo, sendo estas alimentadas em grande parte por várias exurgências cársicas, como por exemplo, as existentes na Fórnea de Alvados (MARTINS, 1949).

A escolha da área de estudo deve-se ao facto de pertencer a uma das áreas mais carsificadas do Maciço Calcário Estremenho (Planalto de Santo António) (MARTINS, 1949; FERREIRA *et al.*, 1988), onde já foram descobertas as entradas de inúmeras cavidades subterrâneas (FLEURY, 1925; MARTINS, 1949; THOMAS, 1985; CANAIS & FERNANDES, 1999; ICNF, 2020; PNSAC, 2020) e para onde existem publicados vários trabalhos no âmbito da Geologia e da Geomorfologia que nos permitiram recolher dados para a avaliação dos vários fatores condicionantes da carsificação (AZERÊDO, 1993; CRISPIM, 1995; RODRIGUES, 1998; CARVALHO, 2013).

O Maciço Calcário Estremenho localiza-se na Região Centro de Portugal e individualiza-se na paisagem sensivelmente a partir dos 200-250 metros de altitude. Através do mapa hipsométrico conseguimos defini-lo e caracterizá-lo, em termos gerais, como um maciço dividido por três compartimentos elevados (diferenciados a partir dos 400 m) e duas grandes depressões (a de Minde-Alvados e a da Mendiga). A altitude máxima (678 m) é registada na Serra de Aire, no bordo sueste do Planalto de São Mamede. Os cursos de água superficiais são praticamente ausentes no maciço, mas na sua bordadura existem várias exurgências que alimentam importantes cursos de água, como o Rio Alviela, o Rio Almonda, o Rio Lena e o Rio Lis.

A nível administrativo, a área correspondente ao Maciço Calcário Estremenho pertence aos concelhos de Leiria, Batalha, Ourém, Porto de Mós, Torres Novas, Alcobaça, Rio Maior, Santarém e Alcanena. Com o facto curioso de nenhuma sede de concelho se localizar na área do maciço, mas na sua bordadura.

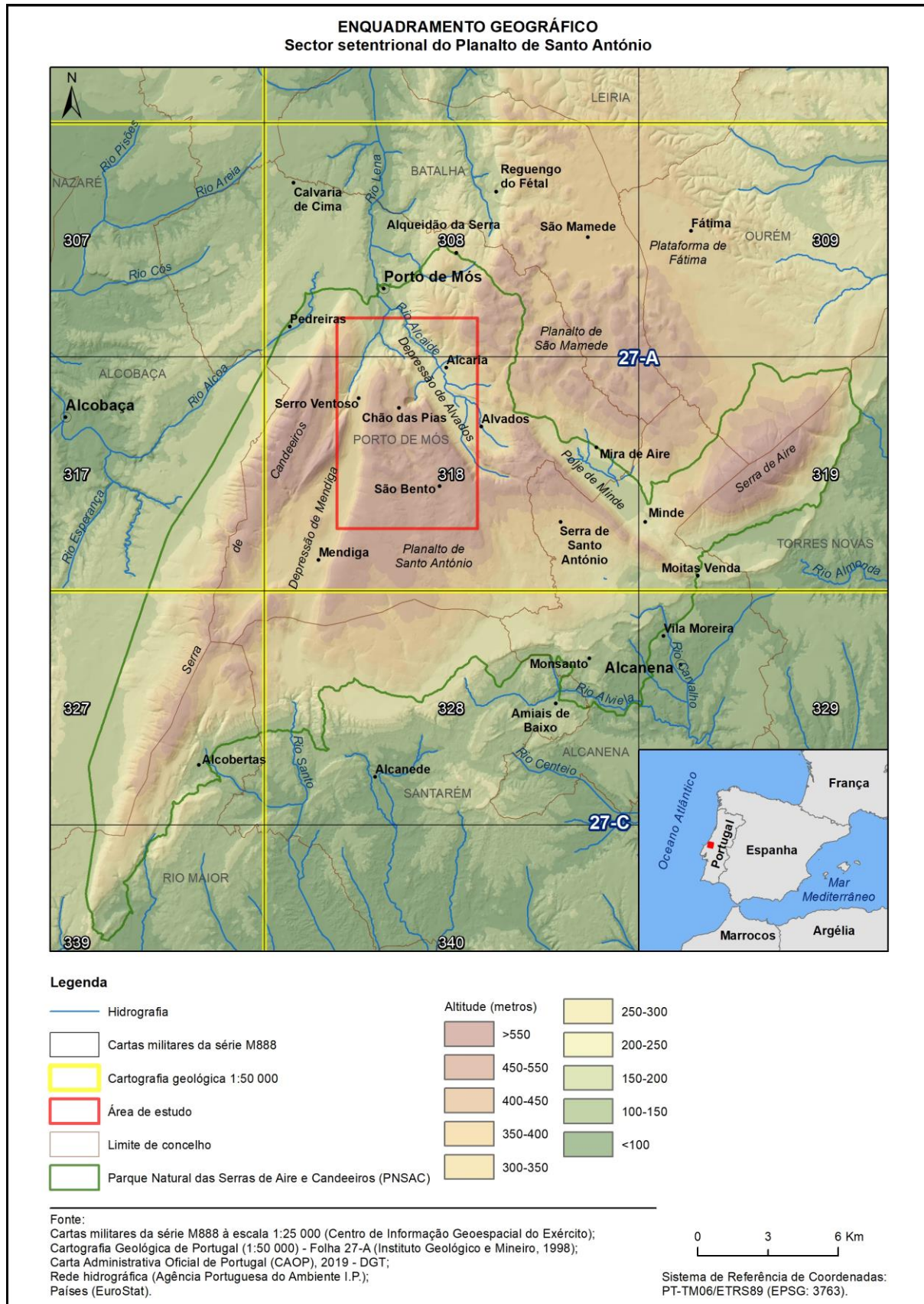


Figura 10 - Enquadramento geográfico do sector setentrional do Planalto de Santo António.

## 5. CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO REGIONAL

Para uma melhor compreensão da influência dos fatores geológicos e geomorfológicos no potencial endocársico da área de estudo, torna-se importante enquadrar estas características no respetivo contexto regional.

### 5.1. Geologia

No âmbito geológico as unidades carbonatadas da área de estudo enquadram-se na Bacia Lusitânica (BL), uma bacia sedimentar com mais de 20 000 Km<sup>2</sup> que se localiza na Margem Ocidental Ibérica. Esta bacia estende-se ao longo de cerca de 200 Km com direção aproximada NNW-SSE e por mais de 100 km na direção perpendicular (KULLEBERG *et al.*, 2013; entre outros). É limitada a leste pelo Maciço Hespérico através de um sistema de falhas, com destaque para a Falha de Porto-Tomar, a Falha dos Arrifes (com contacto mais localizado) e a Falha de Setúbal-Pinhal Novo; a oeste pelo *horst* das Berlengas; a norte por uma transição de estruturas em escadaria sob a ação da Falha de Aveiro; a sul o limite corresponde a uma elevação do Soco Varisco, a sul da Arrábida (KULLEBERG *et al.*, 2013).

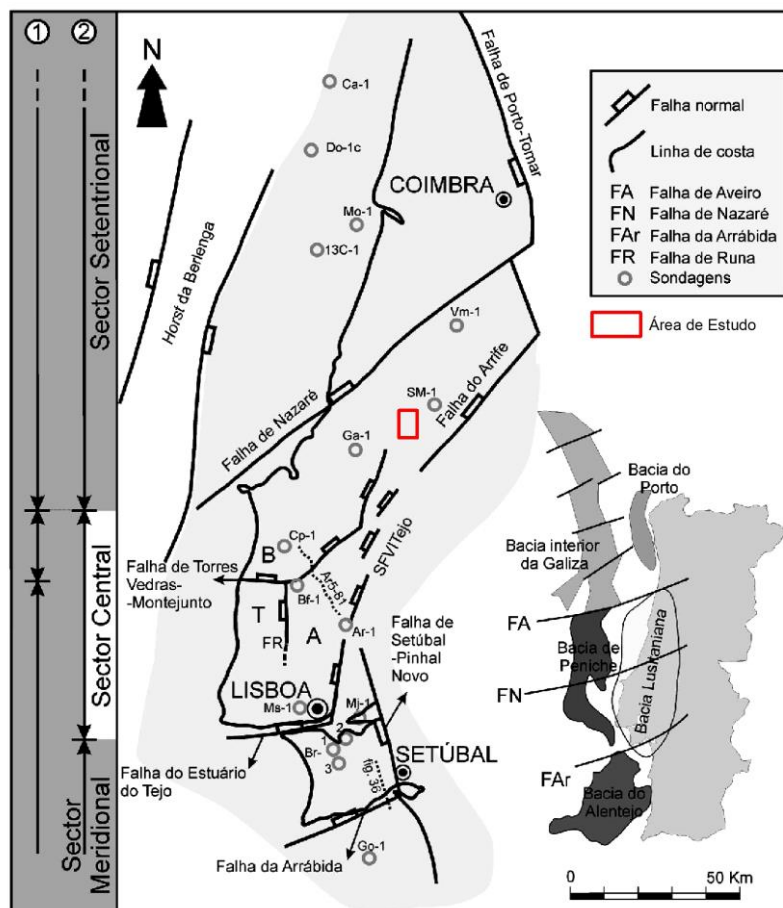
Atendendo às variações de fácies e à espessura das unidades litostratigráficas, a BL foi dividida por alguns autores em três sectores distintos (Figura 11) (ROCHA & SOARES, 1984; KULLEBERG *et al.*, 2013):

1. Setentrional - limitado a sul pela Falha da Nazaré, apresenta grande espessura na sedimentação ocorrida no Jurássico Inferior a Médio e no Cretácico Inferior. O seu limite norte não é bem definido, conforme referido acima;
2. Central - localizado entre as Falhas da Nazaré (a norte) e de Torres Vedras-Montejunto-Arrifes (a sul). A área de estudo localiza-se neste sector, onde o Jurássico Médio aflora bastante e apresenta fortes espessuras, correspondendo de forma genérica à área aflorante do Maciço Calcário Estremenho (Figura 12);
3. Meridional - limitado pelas falhas de Torres Vedras-Montejunto-Arrifes, a norte, e a sul pela Falha da Arrábida. Neste sector destaca-se a importância da sedimentação do Jurássico Superior-Cretácico Inferior.

A instalação da BL (fosso tectónico) ocorreu durante o Mesozoico aquando do afastamento dos continentes (fragmentação da Pangeia) e da abertura do Atlântico Norte por processo de *rifting seguido de drifting* (WILSON, 1988; KULLBERG *et al.*, 2013; 2014a). São distintos domínios oceânicos separados pela Zona de Falha de Açores-Gibraltar, que representa um limite transformante entre placas e que separou dois grandes continentes, Laurásia e Gondwana (RIBEIRO *et al.*, 2013; KULLEBERG

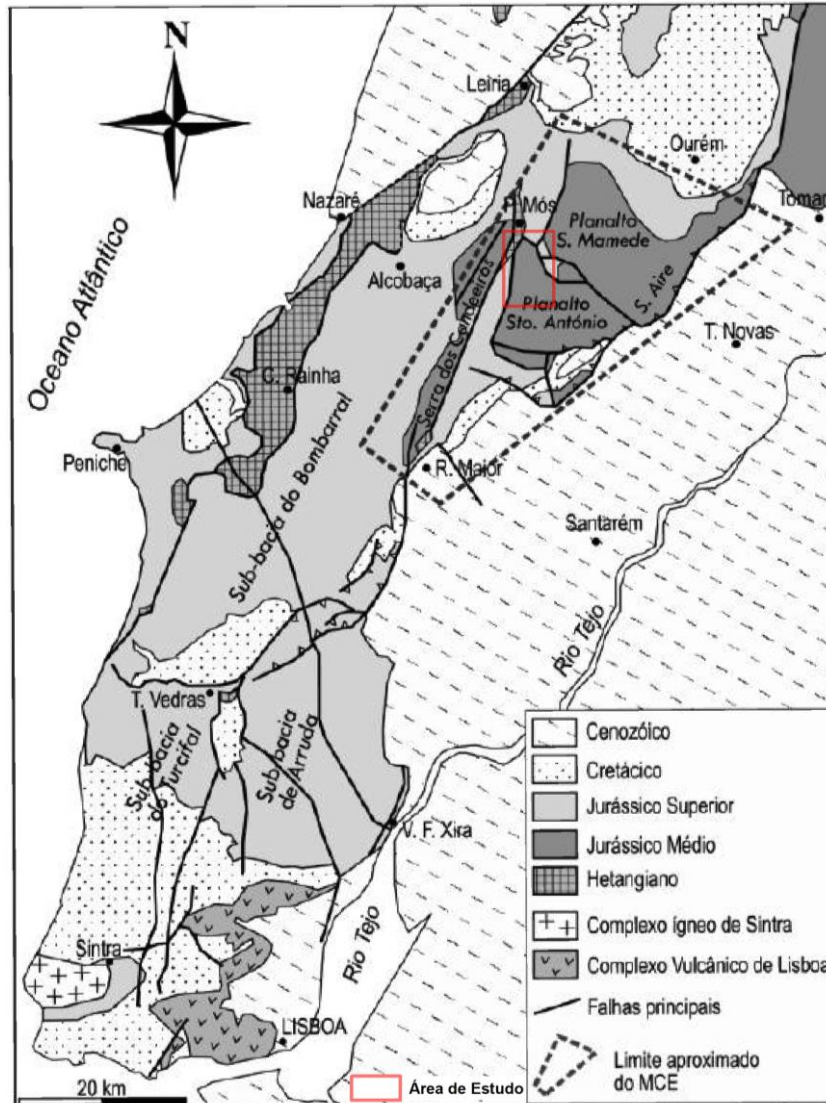


*et al.*, 2013). Numa primeira fase a bacia era um fosso estreito entre o atual Maciço Hespérico e uma faixa continental a oeste, hoje testemunhada pelas Ilhas Berlengas. Durante o Mesozoico depositaram-se neste fosso sedimentos que em alguns locais podem atingir a espessura de 5000 m. Estes sedimentos provieram da erosão do Maciço Hespérico e da referida faixa continental a oeste. A reduzida largura do fosso tectónico levou a que grande parte dos sedimentos mesozoicos fossem depositados em contextos paleogeográficos de transição marinho-continental. Devido a isso, todas as oscilações do nível do mar ficaram registadas nos sedimentos, traduzindo-se em bruscas variações laterais de fácies e de espessura (RIBEIRO *et al.*, 1979). Além da deposição de sedimentos, o processo de *rifting* foi acompanhado de magmatismo que ocorreu em vários ciclos. São exemplos dessa atividade vulcânica o complexo vulcânico de Lisboa e o Maciço de Sintra (KULLBERG *et al.*, 2013). No Maciço Calcário Estremenho esse magmatismo é representado sobretudo pelas rochas eruptivas associadas às estruturas diapíricas e pelas intrusões de gabros e doleritos nas falhas de orientação NW-SE (MANUPPELLA *et al.*, 2000).



**Figura 11** - Enquadramento geográfico e tectónico da Bacia Lusitânica e de outras bacias da Margem Ocidental Ibérica. Sectores: 1) ROCHA & SOARES, 1984; 2) RIBEIRO *et al.*, 1996 in KULLBERG, *et al.*, 2013. Sondagens: Ca – Carapau, Do – Dourada, Mo – Moreia, Vm – Vermoil, SM – S. Mamede, Ga – Gaiteiros, Cp – Campelos, Bf – Benfeito, Ar – Arruda, Ms – Monsanto, Br – Barreiro, Mj – Montijo, Go – Golfinho (Adaptado de KULLBERG *et al.*, 2013).

Os depósitos mais antigos da BL serão do Triásico Médio a Superior e os sedimentos mais recentes, relacionados com o estiramento litosférico têm idade do Aptiano Superior (Cretácico). A partir desta idade, a parte central da Margem Ocidental Ibérica torna-se numa margem passiva e os processos que ocorrem na Bacia de *rifting* deixam de lhe estar geneticamente associados (KULLEBERG *et al.*, 2013 e referências neles incluídas).



**Figura 12** - Enquadramento do Maciço Calcário Estremenho e da área de estudo no Sector Central da Bacia Lusitânica (Adaptado de CARVALHO, 2013).

Com base nas considerações de vários autores, constatamos a existência de várias sequências sedimentares limitadas por discontinuidades que refletem sucessivas etapas evolutivas da bacia. Para o período distensivo mesozoico alguns autores consideram a existência de quatro episódios de *rifting* (*e.g.*, KULLEBERG *et al.*, 2013), outros a existência de três episódios de *rifting* (PENA DOS REIS *et al.*, 2010). No âmbito dos objetivos do presente trabalho destacamos as seguintes características do

período distensivo: (1) deposição de uma megassequência que se desenvolveu do Triásico até ao Sinemuriano e que corresponde aos depósitos essencialmente avermelhados de natureza terrígena (Grupo de Silves) (SOARES *et al.*, 2012), nos quais se inclui o complexo evaporítico das Margas de Dagorda (*sensu* CHOFFAT, 1882, 1883/1884; MOUTERDE *et al.*, 1972; SOARES *et al.*, 1993) e a que se junta a Formação de Coimbra, essencialmente calco-dolomítica, do Sinemuriano (DIMUCCIO *et al.*, 2016); (2) deposição de outra megassequência que se desenvolveu do Pliensbaquiano ao Caloviano Superior/Oxfordiano (conforme os autores), sendo esta composta sobretudo por margas e calcários margosos (*e.g.*, Formação de Fórnea, Formação de Barranco do Zambujal) e por calcários oolíticos /bioclásticos (*e.g.*, Formação Sto António-Candeeiros) (AZERÊDO *et al.*, 2003; AZERÊDO, 2007). De salientar que do Caloviano Superior ao Oxfordiano Inferior existe uma lacuna sedimentar onde se registam episódios erosivos (KULLEBERG *et al.*, 2013); (3) a partir do Oxfordiano médio foi retomada a sedimentação de natureza margo-calcária (Formação de Cabaços), passando a ser francamente marinha no Oxfordiano Superior (Formação de Montejunto), com grande variação de fácies ao longo da bacia. Na passagem para o Kimmeridgiano, a sedimentação passou a ser predominantemente terrígena (Formação de Alcobaça) (PENA DOS REIS *et al.*, 2010), em plataforma carbonatada rasa, mas submetida a descargas siliciclásticas das terras emersas vizinhas (KULLEBERG *et al.*, 2013). Este período traduz-se por uma expressiva sedimentação sobre as unidades adjacentes do Jurássico Médio, originando subsidência tectónica da bacia no eixo paleogeográfico NNE-SSW e o soerguimento das bordas. A pressão desses sedimentos sobre as Margas de Dagorda deve ter acentuado a plasticidade destes materiais promovendo o seu movimento horizontal e ascensional (ALVES *et al.*, 2003, 2006; CARVALHO *et al.*, 2005); (4) no Cretácico Inferior (Berriasiano Superior a Aptiano Superior), os sectores central e meridional da bacia registam sedimentos siliciclásticos depositados em sistemas fluviais (Formação de Figueira da Foz; DINIS, 2001), que passam lateralmente a depósitos marinhos, com margas e calcários, nas zonas mais profundas. Na parte setentrional esta deposição está ausente, o que representa o soerguimento e exposição deste sector da bacia (PENA DOS REIS *et al.*, 2010).

Após os episódios de *rifting*, são reconhecíveis no registo sedimentar pós-Aptiano duas grandes etapas de enchimento que são separadas por uma importante descontinuidade à escala da bacia, evidenciada por erosão e ravinamento das unidades anteriores ao Campaniano (DINIS *et al.*, 2008). Este episódio erosivo foi impulsionado pelo soerguimento de importantes sectores na parte norte e central da bacia, com significativas espessuras de sedimentos (até 1-2 km), a serem erodidos e transportados para o mar (PENA DOS REIS *et al.*, 2010). A fase de pós-rift verifica-se no Kimmeridgiano e o completo preenchimento da BL acontece durante o Cenomaniano (DINIS, *et al.*, 2008, CALLAPEZ, 2010).



A partir do final do Cretácico passa a existir, na Península Ibérica, um regime tectónico compressivo, no contexto da orogenia alpina, que decorreu em duas etapas principais, a fase Pirenaica (final do Cretácico até ao Paleogénico) e a Bética (Miocénico). Deste modo, os terrenos que identificavam a BL foram sujeitos a um progressivo e duradouro regime de levantamento e erosão, com reativação de importantes falhas, onde as estruturas mais evidentes datam do Miocénico (RIBEIRO *et al.*, 1990). O sector central foi o que registou o maior soerguimento tectónico, expondo as unidades mesozoicas aos processos erosivos. Nas zonas relativamente subsidentes, entre os levantamentos do soco, desenvolvem-se bacias sedimentares de tipo flexura, tais como a Bacia Cenozoica do Mondego (a norte da área de estudo) e a Bacia do Baixo Tejo (a sul da área de estudo) (DE VICENTE *et al.*, 2011; PAIS *et al.*, 2012; CUNHA *et al.*, 2013). Na fase bética, a partir do Tortoniano, verificou-se um importante rejogo dos acidentes de orientação bética que levaram ao soerguimento de vários relevos, sendo a cadeia da Arrábida o mais representativo. No Maciço Calcário Estremenho destaca-se o Sistema Cavalgante de Arrife-Vale Inferior do Tejo, que na falha do Arrife coloca as unidades mesozoicas deste maciço calcário sobre os sedimentos mais recentes (sobretudo cenozoicos) da Bacia do Baixo Tejo (Figura 12) (RIBEIRO *et al.*, 1979; KULLEBERG *et al.*, 2013).

## 5.2. Geomorfologia

Como referido anteriormente, a área de estudo localiza-se na Orla Meso-Cenozoica Ocidental, uma das duas orlas sedimentares de Portugal. Essa orla representa uma faixa estreita a ocidente do Maciço Hespérico, sendo que este maciço materializa a maior parte da Península Ibérica. As características morfológicas do Maciço Hespérico diferem bastante das orlas sedimentares. Enquanto no primeiro prevalecem antigas superfícies de aplanamento, nas segundas são frequentes formas estruturais que refletem mais diretamente a estrutura geológica (REBELO & CUNHA, 1991; REBELO, 1992). Nas orlas sedimentares, a instabilidade tectónica e uma grande diversidade litológica, com rochas de diferente suscetibilidade aos processos erosivos, dificultaram o desenvolvimento de grandes superfícies de aplanamento. Superfícies planas que são testemunho de processos de arrasamento são visíveis sobretudo na faixa litoral. Nas áreas mais interiores, as formas planas mais extensas correspondem a formas estruturais, em relação com estruturas sedimentares praticamente horizontais ou a planícies aluviais recentes (Bacia Cenozoica do Tejo-Sado) (DAVEAU, 2004). Os planaltos, como os de São Mamede e de Santo António, no Maciço Calcário Estremenho, representam formas semiestruturais com fraca ondulação das camadas. Já os anticlinais de Candeeiros e Aire, no mesmo maciço, representam grandes relevos estruturais (MARTINS, 1949). Verifica-se assim que a grande diversidade de modelados existente nas orlas sedimentares deve-se também à existência de rochas mais

suscetíveis a deformações do tipo “dúctil”, acompanhadas por intrusões de rochas ígneas (DAVEAU, 2004).

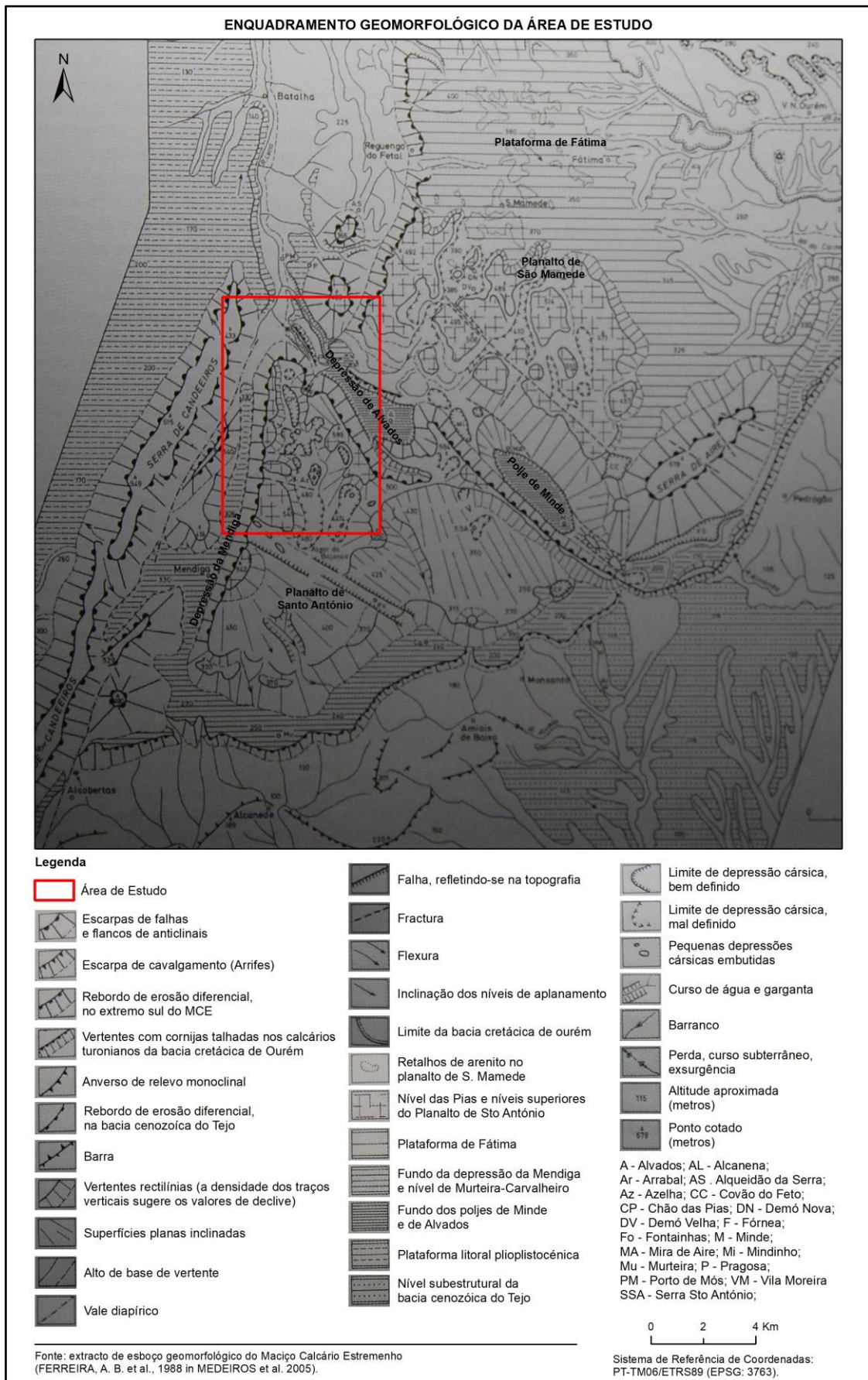
Do ponto de vista morfológico, a Orla Meso-Cenozoica Ocidental é marcada por serras e planaltos calcários, sendo que é a tectónica que define as grandes linhas do relevo e que delimita as suas unidades menores. A diferença de dureza entre litologias, como por exemplo, entre os calcários compactos do Jurássico Médio e as unidades calco-margosas do Jurássico Inferior, explica, em alguns casos, relevos mais salientes em oposição a formas deprimidas. Porém, a formação de anticlinais associados à perda de plasticidade dos calcários, e à ativação de falhas do soco, originou uma tectónica fraturante que originou a movimentação de blocos (que levantam os maciços carbonatados face às regiões marginais), cavalgamentos, volumosas dobras anticlinais, diapirismo e vulcanismo desenvolvido durante o terciário (REBELO & CUNHA, 1991; REBELO, 1992). São exemplos de relevos carbonatados bem individualizados o Maciço de Sicó, o Maciço Calcário Estremenho, a Serra da Arrábida, a Serra de Montejunto e a Serra da Boa Viagem. Na parte norte litoral da orla existem planícies e baixas colinas de argilas e areno-conglomerados; para sul existem colinas onde afloram rochas do Jurássico Superior, pequenos planaltos e relevos residuais (sobretudo de rochas vulcânicas – manto basáltico de Lisboa) (REBELO, 1992). A Serra de Sintra (528 m) surge associada a uma intrusão magmática e é constituída por sienitos e granitos (DAVEAU, 2004). De salientar também a Bacia Sedimentar do Tejo-Sado que representa uma película sedimentar da Orla Ocidental e do Maciço Hespérico e que, no geral, é composta por materiais recentes pouco deformados pela tectónica, caracterizando-se pela simplicidade estrutural que se traduz na paisagem em planuras de vastos horizontes (REBELO, 1992).

O Maciço Calcário Estremenho é constituído por um conjunto de serras e planaltos calcários e é o mais extenso maciço carbonatado de Portugal, mede cerca de 36 Km de norte a sul e tem 23 Km de largura máxima (Figura 13) (DAVEAU, 2004). Tem forma semelhante a um ferro de lança apontado a SW (MARTINS, 1949). A coincidência entre a litologia, representada essencialmente pelas rochas carbonatadas do Jurássico, e a hipsometria, dá-lhe a individualidade. Trata-se de um grande bloco, pouco dobrado, elevado por via da existência de grandes falhas, relativamente às unidades geológicas das regiões vizinhas. De facto, verifica-se que em parte é limitado por acidentes tectónicos, na sua parte meridional (Falha dos Arrifes) e ocidental (Falha do Reguengo do Fetal). A parte sul deste último limite é representado pela Serra dos Candeeiros. No limite setentrional o maciço mergulha gradualmente para as bacias de Ourém e Leiria, porém, é nítido o limite geológico definido pelas unidades do Jurássico Superior. Outro aspeto que marca o Maciço Calcário Estremenho é a sua carsificação, bem nítida através da tendência para a formação de bacias fechadas e da ausência, ou

quase ausência, de cursos de água superficiais. A circulação hídrica é feita através de fissuras e condutas subterrâneas resultantes da dissolução dos calcários até às grandes exurgências que representam a principais cabeceiras de montante dos rios Lis, Lena, Alviela e Almonda (MARTINS, 1949).

Apesar de ser descrito como um grande bloco calcário, a morfologia do Maciço Calcário Estremenho é tudo menos monótona, tal como descrito nas palavras de MARTINS (1949) “[...] *a observar as linhas mestras do cenário, a sensação mais constante, qualquer que seja o ponto de vista escolhido na periferia, é a do levantamento brusco da região alta, nalgumas zonas quase na vertical, noutras com menor declive, mas sugerindo na maioria das vezes que para além dos escarpamentos se estendem vastas plataformas tabulares*”. Existem dois grandes blocos, os planaltos de Santo António e de São Mamede, que são separados por um acidente tectónico de direcção NW-SE ao longo do qual se formaram duas depressões dissimétricas, a de Minde e Alvados, a que a carsificação impôs a sua condição de *poljes*. As duas depressões são levantadas a sudoeste, com abatimento do bloco nordeste e os seus troços, da parte sudoeste, são marcados por íngremes escarpas designadas como Costa de Minde e Costa de Alvados (MARTINS, 1949; FERREIRA *et al.*, 1988). Outro importante acidente no sector ocidental do Maciço Calcário Estremenho é representado pela depressão de origem tectónica da Mendiga, de direcção NNE-SSW, sendo este acidente coincidente com a estrutura diapírica de Rio Maior-Porto de Mós e ladeado, em grande parte, pela Serra dos Candeeiros, a ocidente, e a oriente pelas vertentes do Planalto de Santo António (Costa da Mendiga) (DAVEAU, 2004).

Dos relevos mais elevados distinguem-se as Serras de Aire (678 m), com direcção NNE-SSE, e dos Candeeiros (615 m), com orientação NE-SW (MARTINS, 1949; REBELO & CUNHA, 1991), relacionados com dois volumosos anticlinais, sendo que na Serra dos Candeeiros a estrutura tectónica é complexa (FERREIRA *et al.*, 1988). MARTINS (1949) destaca a importância das falhas para a aparência montanhosa do maciço, nomeadamente: as referidas costas de Alvados e Minde; a periferia oeste e noroeste, onde se destaca um relevo alteroso associado à Falha do Reguengo do Fetal (vertentes do rebordo oeste do Planalto de São Mamede); o cavalgamento dos materiais do Cretácico pelos Calcários do Jurássico Médio na Falha dos Arrifes; falhas associadas à depressão da Mendiga, que contribuíram para a formação do relevo designado Costa da Mendiga, mas também, no sector sul desta depressão, onde existe o imponente relevo do Picoto (614 m). Ao contrário das outras depressões acima referidas, a depressão da Mendiga é bastante irregular nos seus contornos e encontra-se suspensa a 330 m de altitude no seu rebordo setentrional (Figuras 13 e 14).



**Figura 13** - Enquadramento geomorfológico da área de estudo (FERREIRA, A. B. et al, 1988).

Não sendo tão imponente como os relevos anteriores, o anticlinal do Alqueidão possui também um importante significado morfoestrutural. Trata-se de um anticlinal tectonicamente abatido devido ao movimento junto da falha do Reguengo do Fetal, que o colocou numa posição deprimida face ao Planalto de São Mamede (RODRIGUES, 1998). Além disso, é constituído por materiais mais brandos do Jurássico Superior (Oxfordiano e Kimmeridgiano), o que facilitou a ação da erosão (MARTINS, 1949; RODRIGUES, 1998).

Os planaltos de São Mamede e Santo António representam duas unidades morfoestruturais individualizadas fundamentalmente pela tectónica de fratura, porém, internamente possuem estrutura ondulada e apresentam deformações tectónicas menos intensas (MARTINS, 1949; RODRIGUES, 1998).

No Planalto de São Mamede verifica-se um ligeiro empolamento na proximidade das depressões de Minde e de Alvados com as camadas inclinadas 4° a 6°. A norte contacta com a plataforma de Fátima que faz a transição para o bordo sul da bacia Cretácica de Ourém. Este último compartimento constitui-se também por camadas ligeiramente inclinadas que aumentam de pendor quando começam a mergulhar para a referida bacia (MARTINS, 1949). Para NNW, mergulha em flexura em direção ao sinclinal de Pousos e nas direções NW/SE desce de forma mais suave (FERREIRA *et al.*, 1988). MARTINS (1949) identificou vários níveis de aplanamento escalonados (plataforma de Fátima – em torno dos 340 m; Patim – 390 a 400 m; Pias – 490 a 500 m) que procurou correlacionar com outros sectores do Maciço Calcário Estremenho, nomeadamente com o Planalto de Santo António. No Planalto de São Mamede verifica-se o forte condicionamento das formas cársicas pela fraturação, o que originou alguma individualização de formas alongadas. Estas foram condicionadas pela fraturação ortogonal de orientação aproximada NE-SW (FERREIRA *et al.*, 1988; RODRIGUES, 1998). Do ponto de vista litológico o Planalto de São Mamede desenvolve-se em calcários do Jurássico Médio, com grande representação do Batoniano, já na plataforma de Fátima são do Batoniano, Caloviano e Oxfordiano (FERREIRA *et al.*, 1988). De referir ainda que no Planalto de S. Mamede, a presença frequente de depósitos siliciclásticos marca um tipo de carsificação de tipo fluvial, com vales secos, vales cegos e mesmo *sotch*<sup>13</sup> (MARTINS, 1949).

---

<sup>13</sup> Depressão fechada, mais ou menos extensa e com morfologia que sugere a articulação longitudinal de vários vales cegos. Termo utilizado na região cársica de Causses do Gévaudan em França (MARTONNE, 1953). No Maciço Calcário Estremenho, MARTINS (1949) destaca o *sotch* da Lagoa Ruiva que foi formado a partir de um conjunto de dolinas alinhadas em rosário ao longo de um vale seco.



O Planalto de Santo António representa uma superfície balanceada para SE de forma aproximadamente triangular e ondula (RODRIGUES, 1998), com tendência para uma disposição sinclinal de grande raio de curvatura (MARTINS, 1949). A norte e nordeste é delimitado pelas falhas da Costa de Minde e de Alvados, a ocidente pela falha da costa da Mendiga, a sul pela depressão de Alcobertas e a sudeste pela falha dos Arrifes (Figura 13). O sector setentrional do planalto encontra-se mais elevado, sobretudo devido ao levantamento ocorrido ao longo dos acidentes tectónicos referidos (costas de Minde-Alvados e Mendiga). Internamente, este planalto apresenta-se bastante fraturado com predominância de acidentes com direção NW-SE, sendo alguns injetados por rochas ígneas. As maiores altitudes registam-se junto ao topo dos acidentes tectónicos das costas de Alvados, Minde e Mendiga. As superfícies mais elevadas da parte setentrional encontram-se biseladas com embutimento dos retalhos planos (RODRIGUES, 1998) - como o escalonamento desses retalhos é bastante confuso devido à intensa carsificação deste sector torna-se difícil identificar a extensão dos níveis de aplanamento (*e.g.*, nível das Pias), assim como, a sua relação com os níveis do Planalto de São Mamede (FERREIRA *et al.*, 1988). No sector setentrional do referido planalto existe uma profusão de formas cársicas onde é difícil estabelecer padrões e hierarquias, no entanto, existe um condicionamento estrutural dessas formas pela existência de fraturação de direção NW-SE e um alongamento das dolinas e uvalas de maior dimensão com direção subparalela à Costa de Alvados (Figura 14). A ausência de depósitos siliciclásticos indica-nos a existência de uma carsificação mais convencional que o fluviocarso do Planalto de São Mamede (FERREIRA *et al.*, 1988; RODRIGUES, 1998).

A morfologia do Maciço Calcário Estremenho também é marcada pela existência de formas cársicas peculiares. Estas podem ser superficiais (*polje*, fórnias, uvalas, dolinas, lapiás, etc.), ou subterrâneas (algares ou lapas). Neste âmbito, MARTINS (1949) refere que no Maciço Calcário Estremenho as formas subterrâneas estão mais evoluídas que as superficiais e por isso deverão ser mais antigas. Chega mesmo a falar de um carso juvenil, em consideração ao modelado superficial.

### 5.2.1. Formas cársicas superficiais

No Maciço Calcário Estremenho existem dois sectores com abundância de formas cársicas superficiais: o “nível das Pias”, bem definido no Planalto de São Mamede, e o Planalto de Santo António, principalmente na sua parte central e setentrional. São sectores desprovidos de grandes *polje*, mas abundantes em outras formas cársicas menores, como dolinas e lapiás (MARTINS, 1949). No Planalto de São Mamede as dolinas parecem estar associadas a antigos vales fluviais e no Planalto de Santo António surgem juntas, onde se tocam e recortam (*e.g.*, uvalas), encontrando-se também formas embutidas (FERREIRA *et al.*, 1988).

Os lapiás, como formas características da dissolução dos calcários, onde a rocha nua cinzelada é perfurada e lavrada por sulcos mais ou menos profundos e estreitos (MARTINS, 1949), formaram-se tanto em vertentes como em superfícies aplanadas, em condições específicas e com evolução diferenciada (fraturação da rocha - diaclasamento, escoamento das águas, tipo de dissolução, tipo de cobertura, condições ambientais, etc.) (MARTINS, 1949; RODRIGUES, 2012 e referências nela incluídas). No Maciço Calcário Estremenho verifica-se a existência de vários tipos de lapiás em condições distintas, citando-se como exemplos: lapiás em mesa, que se desenvolvem segundo um padrão de fraturação ortogonal (Fotografia 1); lapiás em fendas ou ranhuras, orientados de acordo com descontinuidades estruturais; lapiás em sulcos de vários subtipos, associados à concentração do escoamento superficial; lapiás em agulha, com formas aguçadas rendilhadas; bacias ou pias de dissolução, que se desenvolvem em estruturas horizontais; corredores de dissolução, como resultado da progressiva abertura de fendas lapiares devido à dissolução, que possuem grande dimensão e podem responder também ao abatimento de condutas cársicas subterrâneas (RODRIGUES, 2012). Nas situações em que os lapiás estão preenchidos por uma cobertura detrítica siliciclástica, com *terra rossa*, MARTINS (1949) considera que estes podem continuar a evoluir sobre o manto das argilas de descalcificação, verificando-se também que muitos encontram-se em vias de exumação (Fotografia 2).



**Fotografia 1** - Lapiás em mesa no Planalto de Santo António (Latitude - 39°29'30.4"N; Longitude - 8°48'08.6"W)<sup>14</sup>



**Fotografia 2** - Carso enterrado no Planalto de São Mamede (Latitude - 39°38'15.9"N; Longitude - 8°44'25.5"W).

---

<sup>14</sup> Sistema de referência de coordenadas utilizado nas fotografias: WGS 84/Pseudo-Mercator (EPSG: 3857).



As depressões fechadas superficiais, como dolinas ou *poljes*, foram consideradas por MARTINS (1949) “[...] o mais expressivo emblema da morfologia calcária”, existindo um pouco por todo o Maciço Calcário Estremenho e apresentando dimensão bastante variável. Devido à inclinação das camadas, na plataforma de Fátima são frequentes as dolinas dissimétricas de grandes dimensões (*e.g.*, Cova da Iria). No sector setentrional do Planalto de Santo António surgem várias dolinas profundas em celha, com fundo plano, porém de menor diâmetro e forma alongada (MARTINS, 1949). Neste sector é de assinalar o designado Chão das Pias onde as dolinas de forma alongada parecem definir uma drenagem subterrânea e, ao mesmo tempo, derivam da dissolução e de abatimentos ao longo dos eixos de drenagem (Fotografia 3 e Figura 14). A existência de um curso de água subterrâneo (ribeira do Chão das Pias, *sensu* MARTINS, 1949), a uma altitude de 370 m (30 m abaixo do Chão das Pias), alimentaria as nascentes do Lena. Na parte central deste planalto verifica-se a existência de pequenas dolinas ao longo de fraturas que indicam diferentes fases de corrosão, pelo embutimento de formas. Muitas coalesceram formando uvalas e individualizaram-se em depressões fechadas de maiores dimensões (FERREIRA *et al.*, 1988).



**Fotografia 3** - Chão das Pias no sector setentrional do Planalto de Santo António (Latitude - 39°32'52.0"N; Longitude - 8°48'40.7"W).

O *polje* de Minde (*polje* de Mira-Minde na toponímia atual) e a depressão de Alvados são das formas mais emblemáticas de todo o Maciço Calcário Estremenho. A primeira, situada na base da escarpa da Costa de Minde, possui cerca de 4000 m de comprimento por 1800 m de largura e representa uma depressão fechada com fundo plano que foi aprofundada pela erosão cársica e fluvio-cársica e deve a sua localização à estrutura tectónica neste sector do Maciço Calcário Estremenho (MARTINS, 1949), estrutura essa representada por um fosso tectónico dissimétrico de direção NW-SE (FERREIRA *et al.*, 1988). O seu funcionamento hidrológico baseia-se essencialmente em cursos de água estacionais (Olho da Mira, Poio e Regatinho), que originam inundações nas épocas mais pluviosas transformando o *polje* num lago. Esses cursos de água são alimentados fundamentalmente por três exurgências cársicas localizadas nas margens noroeste, norte e este do *polje*, sendo que parte das águas desaparece através dos *ponors*<sup>15</sup> localizados na parte central leste (RODRIGUES, 1998). A depressão de Alvados (Fotografia 4) é considerada por MARTINS (1949) um *polje* aberto que em determinada altura funcionou como um *polje* típico. Alimentado pelo ribeiro da Canada e outros cursos de água que drenavam este sector do Maciço Calcário Estremenho, provavelmente teve condições para inundação, no entanto, a descida do nível de base, ou o soerguimento do bloco calcário, provocou o entalhe profundo desses cursos de água e o conseqüente aumento da capacidade das condutas subterrâneas, permitindo a drenagem rápida das águas. Da depressão fechada desenvolveu-se um nível de erosão em golfo que agora se encontra suspenso a 260 m (MARTINS, 1949; FERREIRA *et al.*, 1988).



**Fotografia 4** - Depressão de Alvados (Latitude - 39°32'19.9"N; Longitude - 8°45'10.9"W).

---

<sup>15</sup> Algar existente no fundo de uma depressão cársica que funciona como sumidouro quando o nível da toalha freática é baixo e como exurgência (*ponor* emissivo - *estavelle*), quando o nível da toalha freática atinge a superfície (RODRIGUES *et al.*, 2007).

Relativamente à depressão da Mendiga, MARTINS (1949) refere que evoluiu como vale normal que foi regularizado em função de um nível de base próximo dos 280 m, depois terá passado a vale cego e, posteriormente a bacia cársica, ou seja, ao *polje*. Trata-se de uma forma aberta a norte e a sul, composta por tramos de fundo aluvial individualizados em bacias fechadas que alternam com barras cársicas. Apenas o Chão da Mendiga e o Chão da Marinha estão incluídos no contorno do que corresponderia ao *polje*. Sem exurgências, *ponors* ou cursos de água a carsificação desenvolve-se a favor da ampliação das condutas subterrâneas (MARTINS, 1949; FERREIRA *et al.*, 1988).

No Planalto de Santo António são ainda identificadas por MARTINS (1949) outros *poljes* mais pequenos: o do Covão do Feto e o de Chão das Pias (Fotografia 3). Ainda que FERREIRA *et al.* (1988) considerem que sejam de dimensões demasiado reduzidas para serem considerados *poljes*, o do Covão do Feto tem inundações episódicas e apresenta morfologia (fundo aplanado), típica dos autênticos *polje*. No caso de Chão das Pias (depressão alongada com cerca de 1,5 Km) foi considerado como *polje* suspenso por MARTINS (1949), encontrando-se 100 m acima da depressão de Alvados e 130 m acima do *polje* de Minde. A existência de calcários margosos do Jurássico Inferior a cerca de 30 metros da superfície condiciona a infiltração da água, indício comprovado pela exurgência ocasional na Fórnea de Alvados – Buraco da Velha (= Cova da Velha), levou-o a considerar que este *polje* ainda não atingiu o estágio final da sua evolução. O processo de escavamento continuará até o seu fundo coincidir com o nível dos referidos calcários margosos (nível de base cársico local) (Figura 14).

A marcar de forma significativa a geomorfologia e hidrodinâmica do setor norte da Costa de Alvados, a Fórnea (= *Reculée*) de Alvados apresenta-se como um vale vigorosamente entalhado pela erosão regressiva da Costa de Alvados que termina num vertiginoso anfiteatro de imponente grandeza (Figura 14). O talvegue desce três degraus até atingir o fundo regularizado da depressão de Alvados, sendo a sua morfologia dependente geneticamente do mecanismo de restituição das águas no sopé das vertentes. Existem várias exurgências cársicas ocasionais que alimentam a Ribeira da Fórnea, que por sua vez, em conjunto com a Ribeira Canada, alimentam parte do caudal do Rio Alcaide (MARTINS, 1949). Essas exurgências localizam-se a várias altitudes, algumas alcançam altitudes perto dos 400 m e outras localizam-se em altitudes próximas dos 300 m.



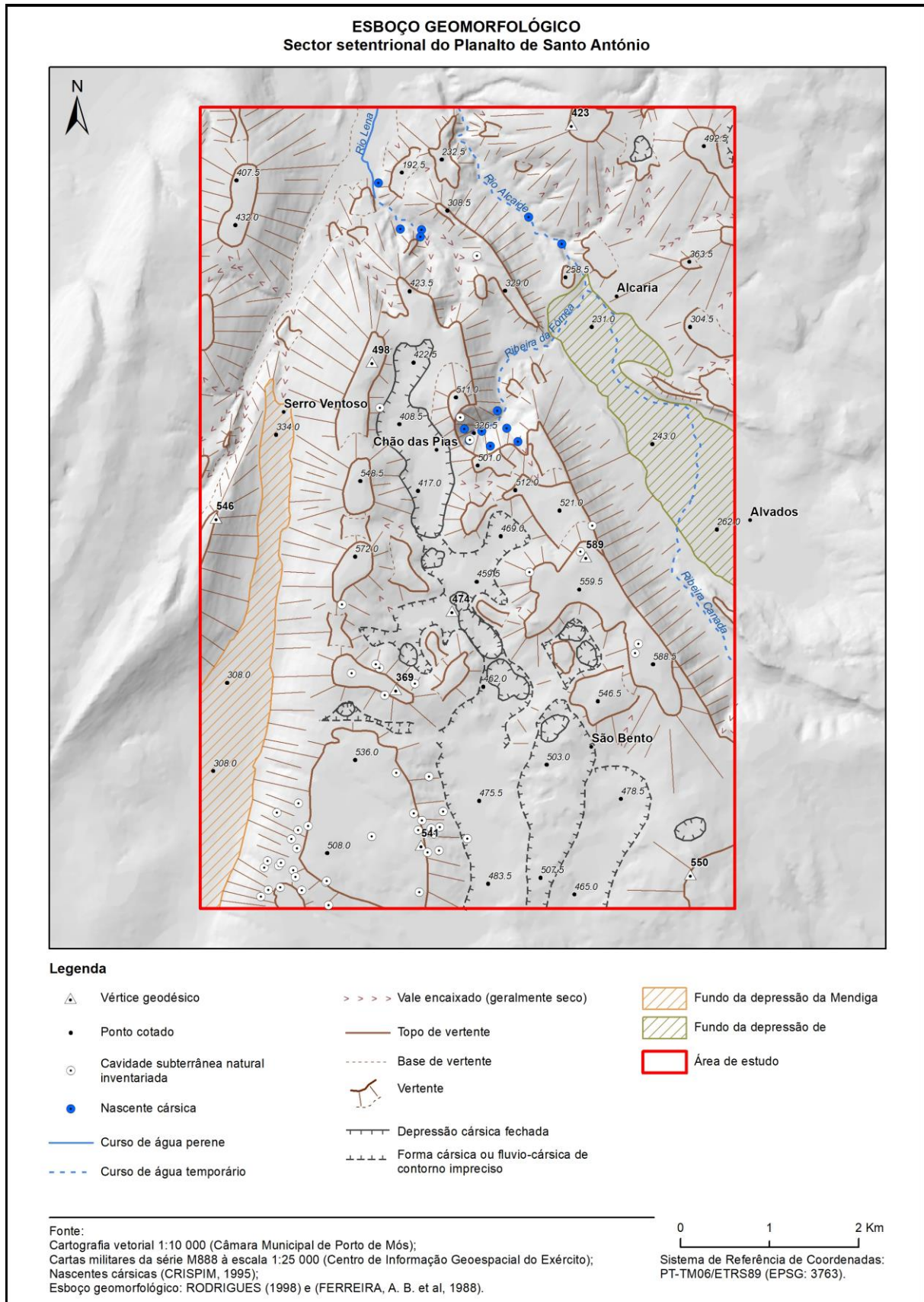


Figura 14 - Esboço geomorfológico da área de estudo.

### 5.2.2. Formas cársicas subterrâneas

Paralelamente à paisagem cársica acima descrita, existe uma paisagem subterrânea ainda em grande parte desconhecida. FLEURY (1925) já fazia notar que *“O povo crê que há na profundidade imensos lagos e grandes rios que alimentam as nascentes da bordadura do maciço.”* Assim, cabe a ciências como a geologia, a geomorfologia ou a espeleologia contribuir para o melhor conhecimento deste lado do carso. O fascínio pela descoberta dessa paisagem subterrânea e a urgência da proteção dos recursos hídricos do endocarso podem ser importantes agentes mobilizadores.

De acordo com FLEURY (1925), o Maciço Calcário Estremenho é seguramente a região portuguesa mais interessante do ponto de vista espeleológico. De facto, são centenas de lapas e algares inventariados e explorados neste maciço, alguns deles explorados até cerca de 90 m de profundidade. Verifica-se que este tipo de formas ocorre preferencialmente nos calcários mais puros do Jurássico Médio (MARTINS, 1949). A espessura das camadas calcárias acima do nível de base cársico faz prever que os algares possam atingir 300 a 400 m<sup>16</sup> com uma rede de galerias<sup>17</sup> bastante extensa (FERREIRA *et al.*, 1988). A título de exemplo, a rede subterrânea relacionada com a nascente do rio Almonda tem cerca de 10 000 m (ARRIEGAS & LUIS, 2015) e a rede associada à exurgência da Cova da Velha (Fórnea de Alvalados) foi explorada e cartografada em 1400 m (THOMAS, 1985).

Como formas do endocarso, as grutas têm a sua maior expressão na paisagem subterrânea do carso e à superfície normalmente apresentam-se com uma ou mais aberturas que foram escavadas lentamente pelas águas de escorrência, através de mecanismos de dissolução e de desgaste mecânico (MARTINS, 1949). Através da exploração espeleológica verificou-se que os algares possuem ligação a complexas redes de condutas subterrâneas e galerias de grandes dimensões (*e.g.*, Algar do Pena – Planalto de Santo António). As descrições das explorações referem quase sempre que a cavidade em exploração fará parte de uma rede subterrânea muito maior (THOMAS, 1985; CANAIS & FERNANDES, 1999), o que mostra bem o elevado potencial para a existência de um endocarso bem desenvolvido e maduro no Maciço Calcário Estremenho, tal como considerado por MARTINS (1949). Também nas palavras de FLEURY (1925) damos conta desse endocarso desenvolvido: *“Este maciço é uma verdadeira esponja, cada vez mais corroída à medida que se desce em profundidade [...]”*.

---

<sup>16</sup> A Associação de Estudos Subterrâneos de Defesa do Ambiente (AESDA) fez uma descida vertical de +/- 250 metros no algar “Palopes” (planalto de Santo António), em 2011 (Jornal Expresso de 3 de junho de 2011).

<sup>17</sup> Passagens cársicas subterrâneas que podem ser transpostas, o seu desenvolvimento é maioritariamente horizontal (RODRIGUES *et al.*, 2007).

Já em 1949, MARTINS notou que a distribuição de algares é desigual no Maciço Calcário Estremenho, sendo mais frequentes no Planalto de Santo António do que no Planalto de São Mamede. Porém, as entradas conhecidas destas formas cársicas são apenas “a ponta do iceberg” da complexa rede de cavidades subterrâneas do maciço. CRISPIM (1995) procurou relacionar as direções de carsificação<sup>18</sup> com a circulação das águas no interior do Maciço Calcário Estremenho e a tectónica, o que permitiria melhorar o conhecimento do endocarso. A tarefa verificou-se complexa devido ao reduzido conhecimento das redes subterrâneas. Ainda assim, concluiu que na comparação de antigas redes com as redes mais recentes existe uma conformidade evolutiva no seu posicionamento, podendo ser o resultado da pequena variação da posição das exurgências principais (Fotografia 5 e Figura 15), por sua vez relacionada com a evolução uniforme do relevo e com o contínuo rejogo das fraturas carsificadas das primeiras fases. Deduziu também que existem vários padrões de circulação nos diferentes sectores do Maciço Calcário Estremenho, tendo como base dados recolhidos em campo (traçagens, caudais das exurgências, tectónica, etc.).



**Fotografia 5** - Exurgência temporária na Fórnea de Alvados (Latitude - 39°33'27.2"N; Longitude - 8°48'24.2"W).

No Planalto de Santo António as traçagens indicam uma separação da circulação na extremidade norte do planalto e o rio Alcaide, não se verificando a circulação para sudeste em Chão das Pias. Neste sector as falhas NNW a NNE drenam redes cársicas independentes, de pequena extensão, verificando-se indícios de uma separação entre a drenagem para o rio Lena e a drenagem para o rio Alviela. Relativamente ao nível de desenvolvimento do endocarso, refere que este será maior no sector de

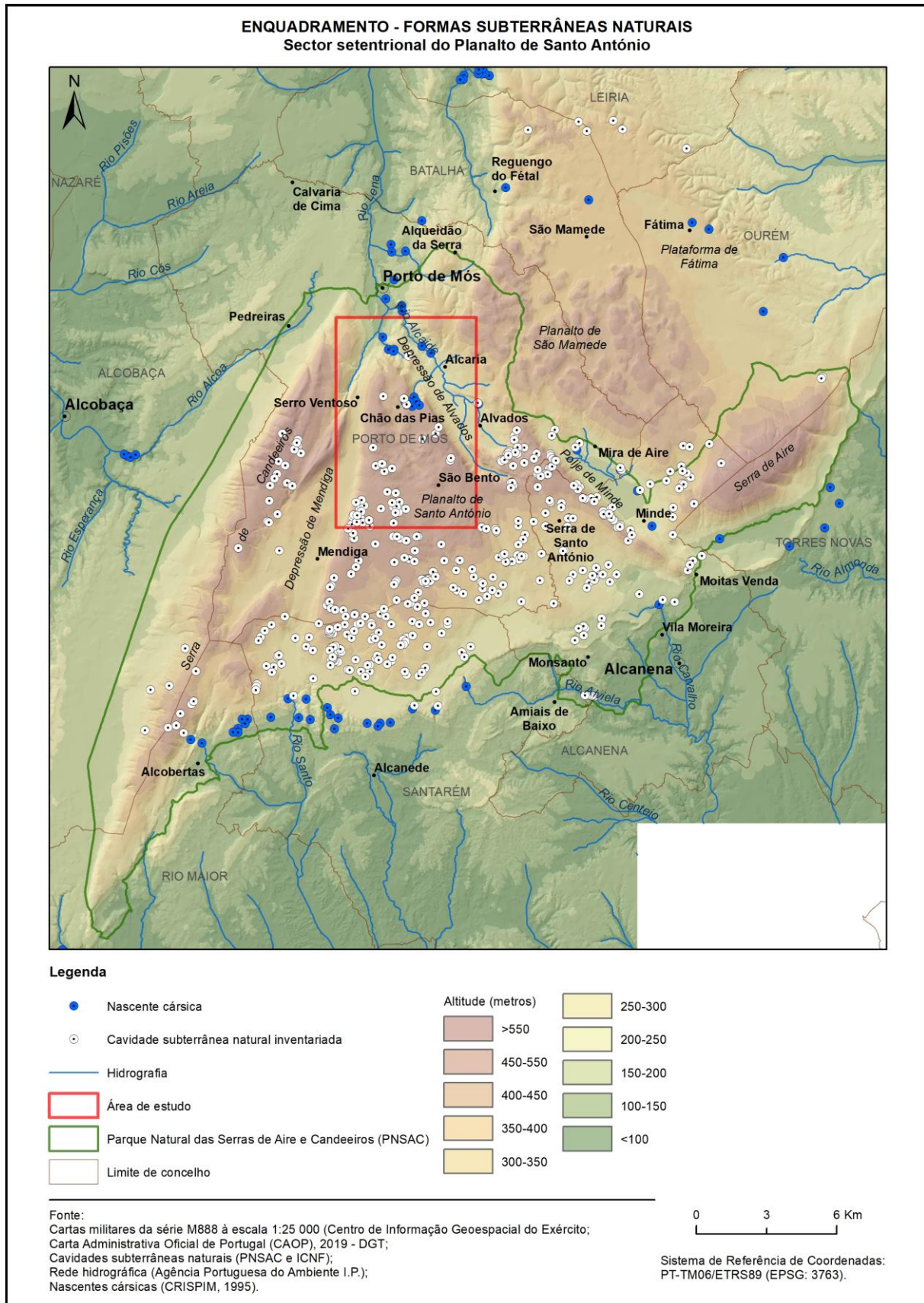
---

<sup>18</sup> Tendo como base as direções do desenvolvimento das cavidades alinhadas com a orientação da fraturação.

Minde do que no sector do Chão das Pias, em virtude da velocidade média da circulação subterrânea (observada através das traçagens), mas também pelo facto das redes subterrâneas se desenvolverem nos calcários do Jurássico Médio, enquanto que em Chão das Pias estas atravessam unidades calcomargosas do Jurássico Inferior.

A avaliação do potencial endocársico assume-se à partida como uma tarefa complexa, principalmente pelo conhecimento parcial que temos das evidências cársicas subterrâneas. Mesmo que a área de estudo seja das mais exploradas por espeleólogos, a avaliação/verificação do modelo cartográfico preditivo através da localização das cavidades naturais inventariadas (representadas por pontos) deve ser entendida sempre numa perspectiva probabilística.





**Figura 15** - Cuidades subterrâneas naturais inventariadas e nascentes cársicas no Maciço Calcário Estremenho.



## 6. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENDOCÁRSICO NA ÁREA DE ESTUDO

### 6.1. Aplicabilidade da análise multivariada

A escolha de uma metodologia eficaz para a definição do potencial endocársico numa determinada área está, em parte, dependente de uma análise correlativa entre as áreas mais ou menos carsificadas à superfície e a existência de um carso subterrâneo mais ou menos desenvolvido. Em teoria, podemos dizer que, conhecendo os fatores condicionantes da carsificação, é possível conjugá-los de modo a estabelecer relações de interdependência, porém, a construção de uma cartografia sistemática deste potencial pode ser conseguida sem conhecer totalmente as relações entre fatores condicionantes e a ocorrência efetiva e sistemática de cavidades naturais. A solução passa por uma classificação supervisionada ou pericial, com conhecimento prévio da área/região em estudo que permita atribuir aos fatores condicionantes diferentes graus de importância relativa na sua contribuição para a carsificação subterrânea (VARGAS *et al.*, 2003).

Outros autores, nacionais e internacionais, têm abordado esta problemática de diferentes perspetivas e em diversos contextos geográficos, utilizando para tal abordagens analíticas e metodológicas distintas, tais como: a construção de um índice de aptidão à ocorrência do endocarso, obtido através da categorização e codificação numérica dos fatores condicionantes (litologia, fraturação, relevo, hidrologia, clima, vegetação, geocronologia, depósitos superficiais) da carsificação em profundidade (VARGAS *et al.*, 2003); a determinação do potencial de carsificação subterrâneo através da aplicação do Processo de Análise Hierárquica onde as variáveis utilizadas foram a litologia, densidade de lineamentos, altitude, declive, quantidade de precipitação, temperatura e cobertura vegetal (MORADI *et al.*, 2016), tal como em NOLA & BACELLAR (2021) que aplicaram o mesmo método utilizando variáveis derivadas do MDE em combinação com a densidade de lineamentos, quantidade de óxidos de ferros no solo e vegetação; a determinação de um “índice cársico” através do produto entre um fator físico-químico e um fator hidrológico obtidos pela soma das ponderações (codificadas numericamente) de vários fatores condicionantes (diferença altimétrica média por unidade carbonatada, áreas de dissolução das rochas, distribuição das unidades carbonatadas, espessuras das camadas, localização de falhas e sua densidade) e de acordo com a sua importância para a carsificação (SEIF & EBRAHIMI, 2014).

A metodologia seguida neste trabalho baseia-se numa análise qualitativa dos dados e na classificação numérica de parâmetros (graus de importância; ordenação; atribuição de pesos/ponderações). Para o efeito, utiliza-se um método de análise multicritério com agregação por um único critério (*e.g.*, avaliação da importância de cada fator para a carsificação subterrânea) em que o investigador assume as suas preferências, com base em critérios referidos na bibliografia e/ou na sua experiência pessoal,

que podem ser representadas/ordenadas em função do valor ou utilidade, como por exemplo, atribuir maior importância ao tipo de litologia do que à fraturação, ou *vice-versa*, para definir o potencial endocársico (SILVA, 2014).

No presente trabalho, e no contexto da análise multicritério operacionalizada através dos SIG, optámos pelo Processo de Análise Hierárquica (AHP – *Analytic Hierarchy Process*), originariamente proposto por SAATY (1988), que tem sido utilizado em estudos onde se tratam aspetos da Geomorfologia e em estudos sobre riscos naturais (FIGUEIREDO, 2001; YALCIN, 2008; AUBRY *et al.*, 2012; RAMOS *et al.*, 2014; MORADI *et al.*, 2016; NOLA & BACELLAR, 2021). Este método torna-se bastante pertinente quando existem vários critérios (fatores), de diferentes níveis de importância para a explicação do fenómeno, sendo mais favorável (ou apenas possível) a análise qualitativa desses critérios.

MORADI *et al.* (2016) aplicaram o Processo de Análise Hierárquica (PAH) em estudo relacionado com o potencial de carsificação subterrâneo e com os resultados alcançados procuraram compreender melhor a hidrodinâmica cársica de uma região do Irão. Para o efeito, utilizaram dados relativos ao tipo de litologia, densidade de lineamentos, altitude, declive, quantidade de precipitação, temperatura e cobertura vegetal. Os resultados obtidos indicam que as áreas com maior potencial de carsificação coincidem com a existência de rochas carbonatadas (calcários e dolomias) e com áreas de maior densidade de lineamentos. NOLA & BACELLAR (2021) também aplicaram o referido método de análise multicritério para cartografarem a suscetibilidade ao desenvolvimento de cavidades em litologias ricas em ferro, numa região do sudeste do Brasil. Foi avaliado o potencial de carsificação subterrâneo em rochas carbonatadas e não carbonatadas (*e.g.*, itabirito – composta quimicamente por sílica e ferro), através da ponderação de variáveis derivadas do MDE (HAND - *Height Above the Nearest Drainage*, declive, plano de curvatura e perfil de curvatura<sup>19</sup>), de avaliação de imagens de satélite (NVDI - *Normalized Difference Vegetation Index* e a quantidade de óxido de ferro) e a densidade de lineamentos. Depois de validarem os resultados constataram que a ocorrência de cavidades subterrâneas nestas condições está sobretudo relacionada com a existência de grandes depósitos de ferro.

Os trabalhos de YALCIN (2008) e RAMOS *et al.* (2014), mostram que a representação cartográfica da suscetibilidade de movimentos de vertente também pode incluir a aplicação do PAH. Para os dois casos foram utilizados dados relativos ao declive, litologia classificada quanto ao nível de desagregação (*e.g.* rochas arenosas soltas), ocupação do solo e exposição das vertentes. No caso de RAMOS *et al.* (2014)

---

<sup>19</sup> Plano de Curvatura: carácter divergente – vales, convergente – interflúvios, ou planar, dos fluxos de matéria e energia nas vertentes. Perfil de curvatura: forma da vertente: convexa, côncava ou retilínea (MELLO & SILVEIRA, 2018).

foi também utilizada a forma das vertentes e em YALCIN (2008) a distância a estradas, a densidade da rede hidrográfica e a distância a cursos de água. Em ambos os estudos é dada maior importância ao declive, litologia e ocupação do solo para a suscetibilidade de movimentos de vertente. Na confrontação dos resultados com a localização de movimentos de vertente confirma-se que as ponderações foram bem atribuídas, e por isso, os modelos preditivos apresentam resultados bastante promissores.

Face aos resultados obtidos nos estudos acima referidos e também pelas considerações/experiência de VARGAS *et al.* (2003), consideramos o PAH adequado aos propósitos do presente estudo. Este método permite a quantificação de critérios qualitativos através da comparação par a par entre as várias classes de cada critério e entre critérios. O resultado deste exercício é uma matriz quadrada onde estão quantificadas as ponderações atribuídas na comparação entre características, indicando quantas vezes um elemento é mais importante relativamente ao outro elemento (Quadro 3). No julgamento é atribuída uma ponderação, de acordo com a proposta de SATTY (1990) (Quadro 4), com a quantificação de cada par de critérios representada pelo seu peso relativo ( $w_{ij}$ ), respeitando as seguintes condições:

$$w_{ij} > 0; \text{ se } w_{ij} = 1, w_{ji} = 1; w_{ij} \text{ é recíproco de } 1/w_{ji}.$$

Após a obtenção da matriz de comparação é determinado o autovalor e autovetor (ou vetor próprio), associado. Este último representa o peso relativo de cada critério ( $W_i$ ) e deve ser normalizado de modo a ser utilizado para quantificar a importância de cada um dos critérios. O vetor próprio pode ser estimado através da média geométrica dos valores de cada critério na matriz (numerador da fórmula 1) e normalizado dividindo-o pela sua soma (fórmula 1). Desta forma, a soma dos seus elementos é igual à unidade (SAATY, 1990).

$$W_i = \frac{(\prod_{j=1}^n w_{ij})^{1/n}}{\sum_{i=1}^n (\prod_{i=1}^n w_{ij})^{1/n}} \quad (1)$$

**Quadro 3** - Matriz de comparações e cálculo do vetor próprio normalizado (adaptado de SAATY, 1990 e RAMOS *et al.* 2014).

<b>Critérios</b>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	...	C <sub>n</sub>	<i>Wi</i>
C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> / C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> / C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> / C <sub>3</sub>	...	C <sub>1</sub> / C <sub>1</sub>	<i>Wi</i> <sub>C<sub>1</sub></sub>
C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> / C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> / C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> / C <sub>3</sub>	...	C <sub>1</sub> / C <sub>1</sub>	<i>Wi</i> <sub>C<sub>2</sub></sub>
C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> / C <sub>1</sub>	C <sub>3</sub> / C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> / C <sub>3</sub>	...	C <sub>1</sub> / C <sub>1</sub>	<i>Wi</i> <sub>C<sub>3</sub></sub>
...	...	...	...	...	...	...
C <sub>n</sub>	C <sub>n</sub> / C <sub>1</sub>	C <sub>n</sub> / C <sub>2</sub>	C <sub>n</sub> / C <sub>3</sub>	...	C <sub>n</sub> / C <sub>n</sub>	<i>Wi</i> <sub>C<sub>n</sub></sub>

Como a matriz é recíproca podemos facilmente determinar a consistência das respostas através do cálculo da razão de consistência (RC), obtida pelo quociente entre o índice de consistência (IC) e um índice de consistência aleatória (CA) (Fórmula 4), este último proveniente de uma grande amostra de matrizes recíprocas positivas construídas por SAATY aleatoriamente até ao tamanho máximo de 10 por 10 (Quadro 5). O cálculo do IC é obtido utilizando o autovalor principal ( $\lambda_{m\acute{a}x}$ ), que é obtido através do produto entre o vetor próprio normalizado (*Wi*) e *w*, que representa a soma das colunas da matriz (Fórmulas 2 e 3). Para que uma tabela seja considerada consistente o RC deve ser menor que 0,1 (SAATY, 1990).

$$\lambda_{m\acute{a}x} = Wi \cdot w \quad (2)$$

$$IC = \frac{(\lambda_{m\acute{a}x} - n)}{(n - 1)} \quad (3)$$

$$RC = \frac{IC}{CA} \quad (4)$$

**Quadro 4** - Ponderação proposta por SAATY (1990).

Intensidade da importância de cada fator (critério)	Definição	Explicação
1	<i>Mesma importância</i>	<i>Os dois critérios contribuem de igual forma para o objetivo</i>
3	<i>Importância moderada</i>	<i>A experiência e o julgamento favorecem moderadamente um critério em relação ao outro</i>
5	<i>Importância essencial ou forte</i>	<i>A experiência e o julgamento favorecem fortemente um critério em relação ao outro</i>
7	<i>Importância muito forte</i>	<i>Um critério é fortemente favorecido e a sua dominância é demonstrada na prática</i>
9	<i>Importância extrema</i>	<i>A evidência favorece um critério sobre o outro com um elevado grau de certeza</i>
2, 4, 6, 8	<i>Valores associados a julgamentos intermédios</i>	<i>Quando se deseja um maior compromisso</i>

**Quadro 5** - Valores de CA em função da ordem da matriz (SAATY, 2009).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CA	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Neste trabalho, o PAH foi implementado com os critérios (fatores/variáveis) do Quadro 6. Todos os cálculos foram realizados utilizando a folha de cálculo disponibilizada por GOPEL (2018) e a cartografia produzida através do software *ArcGIS*. Numa primeira fase procedemos à comparação par a par das classes de cada fator de carsificação, o que permitiu obter o valor  $W_{i_{Classes\ Fatores}}$  a utilizar na produção do mapa com o potencial endocársico. Após a análise de cada fator procedemos à comparação par a par dos fatores com determinação do  $W_{i_{Fatores}}$  e sua aplicação na Fórmula 5, que por sua vez nos forneceu valores para o Potencial endocársico e possibilitou a sua representação cartográfica.

**Quadro 6** - Fatores de carsificação e suas classes para a área de estudo.

Fatores (critérios)	Definição de categorias	Classes para ponderação
Unidades litostratigráficas (susceptibilidade à carsificação)	Aluviões (a); Formação detrítica e terra rossa do Maciço Calcário Estremenho (A); Camadas de Alcobça ( $J^3_{Al}$ ); Margas de Dagorda ( $J^1_{Da}$ ); Rochas eruptivas (doleritos)	Muito baixa
	Camadas de Cabaços e de Montejunto ( $J^3_{CM}$ ); Dolomitos em plaquetas ( $J^1_{pi}$ )	Baixa
	Calcários margosos e margas de Fórnea ( $J^{1-2}_{Fo}$ ); Camadas de Coimbra ( $J^1_{Co}$ )	Moderada
	Calcários de Moleanos ( $J^2_{Mi}$ ); Calcários bioclásticos de Codaçal ( $J^2_{Co}$ ); Margas e Calcários margosos de Zambujal ( $J^2_{ZA}$ )	Elevada
	Calcários micríticos de Serra de Aire ( $J^2_{SA}$ ); Calcários de Chão das Pias ( $J^2_{CP}$ )	Muito elevada
Densidade da fraturação (Km de fraturas por Km <sup>2</sup> )	0 - 1,9	Muito baixa
	1,9 - 4,5	Baixa
	4,5 - 7,6	Moderada
	7,6 - 11,7	Elevada
	11,7 - 19,3	Muito elevada
Energia do relevo (diferença altimétrica em metros numa quadrícula 100m x 100m)	0 - 13	Muito baixa
	13 - 26	Baixa
	26 - 43	Moderada
	43 - 66	Elevada
	66 - 108	Muito elevada
Ocupação do solo	Florestas	Florestas
	Pastagens	Pastagens
	Agricultura	Agricultura
	Matos	Matos
	Espaços descobertos ou com pouca vegetação	Espaços descobertos ou com pouca vegetação
	Territórios artificializados	Territórios artificializados

### Potencial endocársico

$$\begin{aligned}
 &= (W_{i_{\text{Classes Unidades litostratigráficas}}} \times W_{i_{\text{Unidades litostratigráficas}}}) \\
 &+ (W_{i_{\text{Classes Densidade da fraturação}}} \times W_{i_{\text{Densidade da fraturação}}}) \\
 &+ (W_{i_{\text{Classes Energia do Relevo}}} \times W_{i_{\text{Energia do Relevo}}}) \\
 &+ (W_{i_{\text{Classes Ocupação do solo}}} \times W_{i_{\text{Ocupação do solo}}}) \quad (5)
 \end{aligned}$$

Nos subcapítulos seguintes apresentamos os resultados da definição/avaliação das características de cada fator, sendo que as diferenças de metodologia refletem as suas particularidades no fenómeno de carsificação.

## 6.2. Fatores condicionantes

### 6.2.1. Unidades litostratigráficas e geometria das camadas rochosas

A litologia e alguns aspetos relacionados com a geometria das camadas rochosas, existentes na área de estudo, encontram-se representados no mapa da Figura 16. A informação provém da Carta Geológica de Portugal (Folha 27-A Vila Nova de Ourém) e do trabalho de CRISPIM (1995).

Verificamos que as unidades carbonatadas do Jurássico predominam, sendo este período representado desde o Hetangiano, com as Margas de Dagorda ( $J_{DA}^1$ ), até ao Oxfordiano/Kimmeridgiano, com as Camadas de Cabaços e de Montejunto ( $J_{CM}^3$ ). De forma simplificada, as áreas mais elevadas correspondem às unidades do Jurássico Médio e as áreas circundantes, mais deprimidas (*e.g.*, depressões de Alvalos e da Mendiga), a unidades do Jurássico Superior. O Jurássico Inferior encontra-se representado apenas por uma pequena área de afloramento das Camadas de Coimbra ( $J_{Co}^1$ ) e por duas estreitas faixas de Margas da Dagorda ( $J_{DA}^1$ ) com Dolomitos em Plaquetas ( $J_{pi}^1$ ) e Calcários margosos e margas de Fórnea ( $J_{Fo}^{1-2}$ ), estes últimos já com transição para o Jurássico Médio. As restantes unidades litostratigráficas existentes na área de estudo referem-se a depósitos de cobertura [Aluviões (a); Formação detrítica e *terra rossa* do Maciço Calcário Estremenho (A)] e a rochas eruptivas, nomeadamente doleritos. Existe assim um hiato sem representação do Cretácico, Paleogénico e Neogénico, com o Quaternário a ser representado exclusivamente pelos depósitos holocénicos.

Ao nível da estrutura geológica representamos apenas a direção e inclinação das camadas, sendo que os aspetos relacionados com a fraturação foram considerados separadamente no subcapítulo seguinte. A inclinação das camadas, respeitantes às unidades representadas na Figura 16, é bastante variável, com o valor mínimo de 2°, máximo de 85° e com a média a situar-se nos 19°. Uma parte significativa das camadas apresenta inclinação moderada, visto que cerca de 27% dos dados da inclinação são de 10° (sendo este o valor que se repete mais) e aproximadamente 25% são inferiores a 10°. Em termos de distribuição espacial, pelos registos disponíveis, são as camadas do sector do Planalto de Santo António (São Bento a Serro Ventoso) que apresentam a menor inclinação média, sendo que 57% dos valores inferiores a 10° na área de estudo localizam-se neste sector.



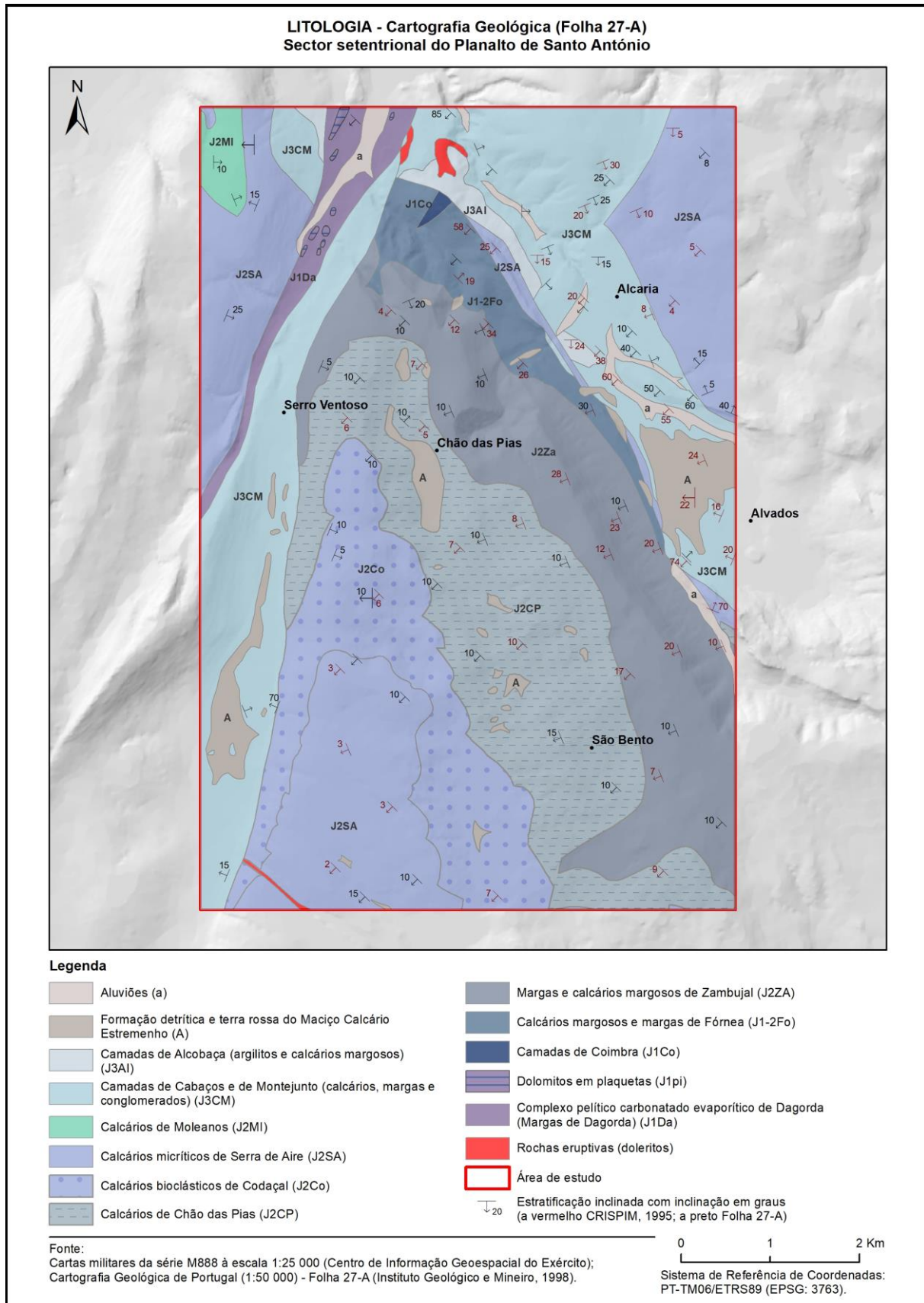


Figura 16 - Mapa litológico do sector setentrional do Planalto de Santo António.



AZERÊDO (2007) apresenta a formalização das unidades litostratigráficas do Jurássico Inferior e Médio do Maciço Calcário Estremenho, procurando ordenar e oficializar os conhecimentos prévios. Os critérios adotados para essa formalização resultaram, claramente, numa maior generalização (subdivisões das sucessões carbonatadas aflorantes em Formações e Membros) com base na arquitetura das fácies sedimentares (fácies e associações de fácies), à escala regional. No Quadro 7 descrevemos as unidades aflorantes na área de estudo e sua correspondência com as unidades litostratigráficas formalizadas em AZERÊDO (2007). As unidades sobre as quais não existem considerações no trabalho de AZERÊDO (2007), nomeadamente as formações do Kimmeridgiano e Hetangiano, serão analisadas através de informações existentes na Notícia Explicativa da Folha 27-A e trabalhos académicos realizados sobre a geologia/geomorfologia da área de estudo.

**Quadro 7** - Correspondência entre unidades litostratigráficas jurássicas propostas em AZERÊDO (2007), Folha 27-A do Instituto Geológico e Mineiro (1998) e MANUPPELA *et al.* (2000). Adaptado de AZERÊDO (2007).

Cronostratigrafia		AZERÊDO (2007)		Cartografia Geologica (Folha 27-A) e MANUPPELA <i>et al.</i> (2000)	
Período e Época	Idade	Formações	Membros	Formações	
Jurássico Superior	Kimmeridgiano	-	-	Camadas de Alcobça (J <sup>3</sup> <sub>Al</sub> )	
	Oxfordiano/ Kimmeridgiano	Formação de Cabaços	-	Camadas de Cabaços e de Montejunto (J <sup>3</sup> <sub>CM</sub> )	
Jurássico Médio	Caloviano	Formação de Santo António-Candeeiros	Membro de Moleanos	Calcários de Moleanos (J <sup>2</sup> <sub>MI</sub> )	
	Batoniano	Superior	Formação de Serra de Aire		
		Inferior	Formação de Santo António-Candeeiros	Membro de Codaçal	Calcários bioclásticos de Codaçal (J <sup>2</sup> <sub>Co</sub> )
	Bajociano	Superior	Formação de Chão das Pias	Calcários de Vale da Serra	Calcários de Chão das Pias (J <sup>2</sup> <sub>CP</sub> )
	Bajociano Inferior/Aaleniano		Formação de Barranco do Zambujal	-	Margas e Calcários margosos de Zambujal (J <sup>2</sup> <sub>ZA</sub> )
Jurássico Inferior	Sinemuriano?/Pliensbachiano e Toarciano	Formação de Fórnea	-	Calcários margosos e margas de Fórnea (J <sup>1-2</sup> <sub>Fo</sub> )	
	Sinemuriano	Formação de Coimbra	Membro dolomítico	Camadas de Coimbra (J <sup>1</sup> <sub>Co</sub> )	
	Hetangiano	-	-	-	Dolomitos em plaquetas (J <sup>1</sup> <sub>pi</sub> )
-		-	-	Margas de Dagorda (J <sup>1</sup> <sub>Da</sub> )	

A análise das unidades litostratigráficas focou-se na avaliação da sua suscetibilidade à carsificação. Foram feitas descrições e associações relativas a: litologia; tipo de fácies; granulometria; textura; estratonomia; porosidade primária (aparente); e geometria das camadas. Estas componentes foram avaliadas individualmente quanto à maior ou menor suscetibilidade para a carsificação e o seu somatório indica a suscetibilidade à carsificação de cada unidade litostratigráfica, sendo que os valores podem variar entre 0 e 4 em acordo com o quadro 6. Deste modo, obtivemos um valor de suscetibilidade à carsificação para cada unidade (Quadro 8), pois é este o elemento que se encontra cartografado na carta geológica oficial (Figura 16)

A avaliação da suscetibilidade à carsificação das unidades litostratigráficas teve como base os pressupostos expostos nos subcapítulos 3.1 e 3.2. Nos aspetos relacionados com o tipo de rocha, considerámos como sendo mais favoráveis à carsificação as rochas carbonatadas mais puras, com maior percentagem de calcite (*e.g.*, o calcário será mais carsificado que o calcário dolomítico). Nas rochas carbonatadas impuras também foram realizadas valorações diferentes, onde as rochas que apresentam mais constituintes impermeáveis, como os calcários margosos ou margas, são consideradas menos propensas à carsificação, ao passo que as rochas carbonatadas com uma grande percentagem de grãos de quartzo (e/ou de outros componentes insolúveis), ainda que favorecem uma circulação das águas mais eficaz, são consideradas intermediamente propensas à carsificação.

A textura e a granulometria estão muito dependentes do tipo de fácies carbonatadas (Quadro 1), daí que sejam avaliadas em conjunto. Aqui considerámos que as texturas micríticas e matriz-suportadas são mais carsificáveis que as esparíticas e grão-suportadas. Foi ainda incorporada a avaliação da porosidade aparente qualitativa (primária), tal como INÊS (2010) aplicou na análise de 98 amostras de rochas carbonatadas pertencentes ao Jurássico Médio para área de estudo, com a vantagem de que neste trabalho as referidas rochas foram associadas às fácies identificadas por AZERÊDO (1993, 1998). Para a avaliação das restantes rochas (Jurássico inferior e Jurássico Superior) recorreremos a trabalhos sobre as sucessões carbonatadas que existem na área de estudo e à notícia explicativa da carta geológica (Folha 27A – Vila Nova de Ourém).

A recolha de informação sobre a estratonomia das unidades permitiu fazer uma avaliação para toda a sucessão carbonatada, viabilizando uma análise de conjunto onde se salientam características potenciadoras da carsificação, que não são perceptíveis na avaliação das fácies. Existe maior suscetibilidade à carsificação em sucessões carbonatadas com camadas homogéneas mais espessas, por comparação com as sucessões mais heterogéneas em que, juntamente com os estratos solúveis, interestratificam outras camadas (ou conjuntos líticos) relativamente mais insolúveis (tais como quartzarenitos, margas e pelitos/argilitos mais ou menos carbonosos, etc.).

Com a informação sobre a geometria das camadas, recolhida na cartografia geológica oficial e outros trabalhos realizados na área de estudo, complementamos a avaliação da suscetibilidade à carsificação de cada unidade litostratigráfica, norteados pelo princípio de que camadas menos inclinadas originam uma circulação mais lenta das águas e uma maior capacidade de dissolução. As camadas mais espessas também foram consideradas mais propensas ao desenvolvimento de cavidades, de acordo com as considerações teóricas prévias.

Face ao referido no subcapítulo 3.4 os depósitos de cobertura (A e a) foram avaliados quanto à sua suscetibilidade à carsificação em função da sua contribuição para a carsificação das rochas subjacentes, uma vez que se trata de rochas não solúveis, mas não completamente impermeáveis. Assumimos que essas unidades representam um fator potenciador da carsificação: por via da acidificação das águas meteóricas, tornando-as mais agressivas sobre as rochas carbonatadas; e pela redução da velocidade de percolação dessas águas, quanto mais lenta a circulação das águas, maior o tempo de contacto com o maciço rochoso, logo maior a capacidade de dissolução. As rochas eruptivas (doleritos), também foram ponderados no referido quadro, apesar de serem consideradas como rochas não carsificáveis, ainda que normalmente estejam associados a fraturas ou descontinuidades que podem representar condições preferenciais de infiltração das águas meteóricas no maciço rochoso e assim alcançar as unidades carbonatadas encaixantes.

No Quadro 8 apresentamos a ponderação da suscetibilidade à carsificação para as unidades litostratigráficas da área de estudo, em cada uma das componentes avaliadas. No Quadro 9 apresentamos a classificação obtida para suscetibilidade à carsificação juntamente com os dados cronoestratigráficos e com as designações atribuídas às unidades litostratigráficas. Verificamos que, como era de esperar, as unidades do Jurássico Médio são as mais propensas à carsificação, nomeadamente, os Calcários micríticos de Serra de Aire ( $J^2_{SA}$ ) e os Calcários de Chão das Pias ( $J^2_{CP}$ ). As restantes unidades do Jurássico Médio apresentam também suscetibilidade elevada. No oposto, as unidades do Jurássico Inferior e Jurássico Superior são menos suscetíveis à carsificação, ainda que os Calcários margosos e margas de Fórnea ( $J^{1-2}_{Fo}$ ) e as Camadas de Coimbra ( $J^1_{Co}$ ), apresentem uma propensão moderada à carsificação. Na Figura 17 encontra-se a representação cartográfica das unidades litostratigráficas de acordo com a sua suscetibilidade à carsificação. Verificamos que as unidades mais suscetíveis à carsificação se localizam (grosso modo), no sector do Planalto de Santo António, termo norte da Serra dos Candeeiros e numa área a este de Alcaria. De salientar que estas localizações coincidem com áreas de maior altitude (ver mapa da Figura 15). As formações menos propensas à carsificação coincidem com as depressões da Mendiga e de Alvados e com o alinhamento diapírico de Rio Maior-Porto de Mós.

Quadro 8 - Avaliação da suscetibilidade à carsificação nas várias componentes das unidades litostratigráficas existentes na área de estudo.

Designação <sup>20</sup>	Litologia <sup>21</sup>	SC <sup>21</sup>	Fácies <sup>21</sup>	Granulometria, textura e porosidade (aparente) qualitativa <sup>22</sup>	SC	Estratonomia <sup>23</sup>	SC	Geometria das camadas <sup>24</sup>	SC	Σ - (avaliação qualitativa) <sup>25</sup>
Aluviões (a); Formação detrítica e <i>terra rossa</i> do Maciço Calcário Estremenho (A)	Depósitos siliciclásticos, por vezes com uma componente margosa.	0	Fácies arenosas e pelíticas.	Areias e pelitos com textura geralmente grão-suportada. Porosidade excelente (avaliada com base no tipo de litologia, granulometria e textura).	0,9	Não apresentam uma aparente organização em camadas, mas sim uma estrutura massiva a preencher os fundos de vale (aluviões) e algumas depressões e fendas de natureza cársica (depósitos siliciclásticos com terra rossa).	0	-	0	0,9 (Muito baixa)
Camadas de Alcobaça (J <sup>3</sup> <sub>Al</sub> )	Margas, por vezes siltitos, calcários e arenitos.	0,2	Fácies calcárias micríticas ( <i>Mudstones</i> ), argilas carbonatadas silto-arenosas e arenitos silto-argilosos.	Pelitos a areias matriz-suportada que contêm várias associações fossilíferas. Porosidade pobre (avaliada com base no tipo de litologia, granulometria e textura).	0,2	Base até ~57 m (espessas camadas de argilas silto-arenosas e de arenitos silto-argilosos); 57 a 102 m (Camadas de arenitos (~30 m), ora finos ora grosseiros, micáceos e de argilas silto-arenosas, formando intercalações mais finas (1 a 5 m); 102 a 215 m (arenitos micáceos (~113 m), de finos a muito finos, cinzentos e de argilas silto-arenosas micáceas, cinzento-esverdeadas, com concreções calcárias, por vezes ferruginosas); 215 a 269 m (argilas carbonatadas silto-arenosas (~54 m), com finas intercalações calcárias); >269 m (calcários micríticos).	0,2	Espessura cerca de 150 a 200 m; inclinação média 25° (min. 15° e máx. 38°).	0,3	0,9 (Muito baixa)
Camadas de Cabaços e de Montejunto (J <sup>3</sup> <sub>CM</sub> )	Calcários argilosos e margas.	0,4	<i>Mudstones/wackestones</i> associados a raros <i>packstones</i> e <i>grainstones</i> .	Calcários micríticos argilosos, calcários associados a margas, calcários microspáriticos, calcários pelimicríticos bioclásticos. Menos de 10% de grãos > 2mm; presença de matriz microcristalina carbonatada; grãos sem contato (textura matriz-suportado). Porosidade pobre (avaliada com base no tipo de litologia, granulometria e textura).	0,4	Base 3 m (calcário na base e margas amareladas com concreções ferruginosas); 6 m (calcário argiloso pelmicrítico muito bioclástico); 0,40 m (calcário argiloso); 0,50 m (calcário micrítico argiloso); 20 m (calcário micrítico intraclástico); 2 m (conglomerado monogénico de matriz calcária, compacto)?, (calcário microspáritico, com pelóides e intraclastos); 30 m (calcário pelmicrítico muito bioclástico).	0,3	Cerca de 65 m de espessura; inclinação média 34° (min. 8° e máx. 85°).	0,2	1,3 (Baixa)
Calcários de Moleanos (J <sup>2</sup> <sub>Ml</sub> )	Calcários	0,5	Litofáceis 2 - <i>rudstones</i> ; <i>grainstones</i> ; <i>packstones</i> Oolíticos/bioclásticos/oncolíticos/litoclásticos (AZERÊDO, 1993, 1998).	Mais de 10% de grãos > 2mm; Ausência de matriz cristalina carbonatada; grãos em contato (textura grão-suportada). Porosidade avaliada por INÊS (2010): desde pobre até excelente.	0,7	Base 20-30 m (alternâncias de calcários oolíticos bem calibrados e calciclásticos mais grosseiros, por vezes com níveis de base erosiva); 35-40 m (calcários mais compactos, pelibiomicríticos); parte superior; >100 m (sucessão torna-se mais clástica, com níveis maciços de calcários calciclásticos).	0,6	Espessura de 150 metros, atingindo provavelmente 180-200 metros; inclinação média entre 20 a 25°.	0,6	2,4 (Elevada)

<sup>20</sup> Informações recolhidas em MANUPPELLA *et al.* (2000) e KULLEBERG *et al.* (2006, 2013). Para unidades do Jurássico Médio (Aaleniano a Batoniano), as fácies descritas foram propostas por AZERÊDO (1993, 1998).

<sup>21</sup> Suscetibilidade à carsificação, ponderação de 0 a 1.

<sup>22</sup> Granulometria e textura de acordo com a classificação de DUNHAM (1962) e EMBRY & KLOVAN (1971) in SALOMON, 2000. Avaliação para a porosidade primária com base na classificação da porosidade qualitativa adotada por INÊS (2010), baseada no trabalho de AHR (2008): pobre (0-5 %); razoável (5-10%); boa (10-15%); boa/excelente (15-20%) e excelente (> 20%). Para litologias que não foram avaliadas por INES (2010), foi feita avaliação com base no tipo de litologia e/ou textura das fácies carbonatadas.

<sup>23</sup> Informações recolhidas em MANUPPELLA *et al.* (2000).

<sup>24</sup> Informações recolhidas em CRISPIM, 1995; Folha 27-A do Instituto Geológico e Mineiro, 1998; MANUPPELLA *et al.*, 2000.

<sup>25</sup> Valores de 0 a 4, com a seguinte ponderação: 0-1 (Muito baixa); 1-1,5 (Baixa); 1,5-2,3 (Moderada); 2,3-3 (Elevada); 3-4 (Muito elevada).

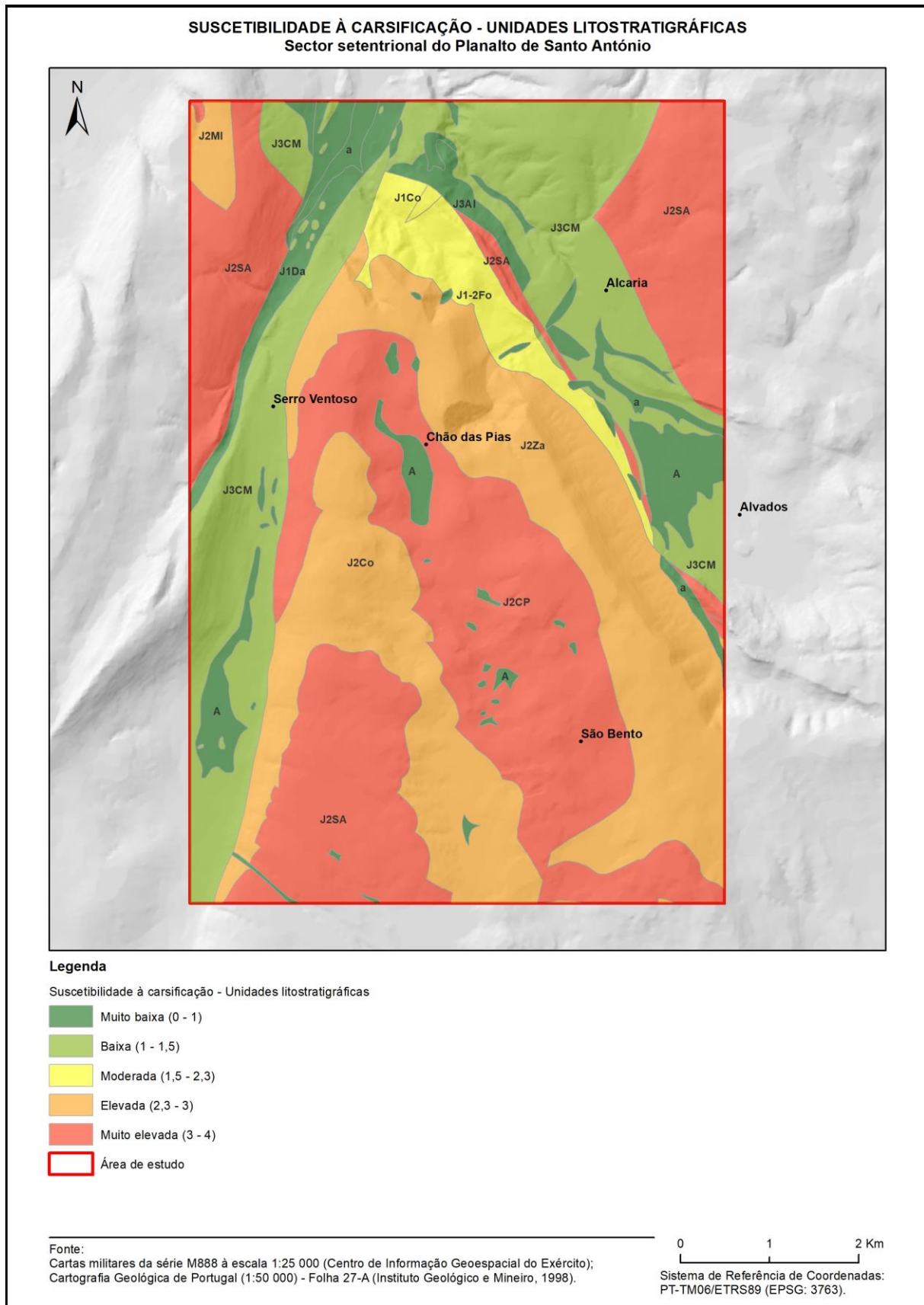
Calcários micríticos de Serra de Aire (J <sup>2</sup> <sub>SA</sub> )	Calcários	0,8	Litofácies 6 – <i>Mudstones</i> e <i>wackestones</i> oncolíticos com <i>fenestrae</i> e laminações ( <i>idem</i> ). Litofácies 7 - <i>Floastones</i> , <i>wackestones</i> e <i>mudstones</i> com nódulos algais/oncóides e ferruginização ( <i>ibidem</i> ).	Níveis dolomíticos; calcários micríticos e dolomicríticos (compactos ou laminares). Menos de 10% de grãos > 2mm; presença de matriz microcristalina carbonatada; grãos sem contato; mais de 10% de grãos > 2mm e grãos sem contato. Porosidade avaliada por INÊS (2010): Pobre para Litofácies 6 e Pobre a Razoável para Litofácies 7.	0,8	Base 50 m (sequências cíclicas de calcários e calcários dolomíticos micríticos, camadas decimétricas fenestradas; dolomicrites laminares); <150 m (calcários micríticos compactos, fenestrados ou oncolíticos, com laivos ferruginosos, em camadas 40-50 cm a métricas); >150 m (decréscimo dos calcários fenestrados e oncosparíticos, tornando-se calcários micríticos fossilíferos; calcários biomicríticos ou pelimicríticos).	0,9	Espessura de 350 a 400 m; inclinação média 14° (min. 2° e máx. 70°).	0,8	3,3 (Muito elevada)
Calcários bioclásticos de Codaçal (J <sup>2</sup> <sub>Co</sub> )	Calcários	0,7	Litofácies 1 – <i>Grainstones</i> oolíticos e bio-intraclásticos com estratificação oblíqua ( <i>idem</i> ). Litofácies 2 - <i>rudstones</i> , <i>grainstones</i> e <i>packstones</i> bioclásticos/oncolíticos/Litoclásticos ( <i>ibidem</i> ).	Calcários bioclásticos e oobioclásticos e esporadicamente dolomitizados. Mais de 10% de grãos > 2mm; Ausência de matriz cristalina carbonatada; grãos em contato. Porosidade avaliada por INÊS (2010): Pobre a razoável para Litofácies 1 e desde pobre a excelente para Litofácies 2.	0,8	8-10 m de espessura (calcários oolíticos finos bem calibrados com laminação/estratificação oblíqua de pequena escala (0,5-2cm e 16-28°), <i>hardground</i> milimétrico a 5 m da base); 5 m (recobrimentos micríticos fragmentados e/ou bioperfurados na base de lâminas de feixes estratificados oblíquos de calcários oolíticos (10-13 cm e 18-20 cm); 10 m (calcários bioclásticos e oolíticos com intraclastos, estratificação oblíqua com 12° e 22°); 5-6 m (calcários bioclásticos e oolíticos com espessura média dos feixes de estratificação oblíqua: 30-40 cm a 70-100 cm).	0,5	Espessura média na ordem de 50 a 60 m, podendo aumentar até cerca de 70-80 m; inclinação média 8° (min. 5° e máx. 10°).	0,9	2,9 (Elevada)
Calcários de Chão das Pias (J <sup>2</sup> <sub>CP</sub> )	Calcários levemente argilosos ou margosos, calcários e calcários dolomíticos.	0,7	Litofácies 9a – <i>Mudstones</i> , <i>wackestones</i> e <i>packstones</i> bioclásticos (calcários compactos) ( <i>ibidem</i> ).	Menos de 10% de grãos > 2mm; Presença de matriz microcristalina carbonatada; Grãos sem contato; Ausência de matriz microcristalina carbonatada e grãos em contato. Porosidade avaliada por INÊS (2010): Pobre.	0,8	Primeiros 15 m (calcários levemente argilosos ou margosos em bancadas decimétricas com nódulos siliciosos); A 40 m do topo os nódulos tornam-se maiores (botrioidais). Sucessão caracterizada pela alternância de calcários micríticos e calciclásticos.	0,7	Espessura cerca de 50-60 m, atingindo, contudo valores >80 m? Inclinação média 9° (min. 5° e máx. 15°).	0,9	3,1 (Muito elevada)
Margas e Calcários margosos de Zambujal (J <sup>2</sup> <sub>ZA</sub> )	Margas, calcários margosos, calcários argilosos e calcários.	0,4	Litofácies 9a – <i>Mudstones</i> , <i>wackestones</i> e <i>packstones</i> bioclásticos (calcários compactos) ( <i>idem</i> ). Litofácies 9b – <i>Mudstones</i> , <i>wackestones</i> e <i>packstones</i> bioclásticos (calcários, calcários margoso-argilosos e margas) ( <i>ibidem</i> ).	Menos de 10% de grãos > 2mm; Presença de matriz microcristalina carbonatada; Grãos sem contato; Ausência de matriz microcristalina carbonatada e grãos em contato. Porosidade avaliada por INÊS (2010): Pobre.	0,8	Alternância rítmica de margas, calcários margosos e calcários argilosos, em camadas quase sempre pouco espessas. Da parte inferior para o topo a sucessão torna-se cada vez mais espessa (camadas decimétricas a métricas) e mais calcária, até ao desaparecimento dos níveis margosos. Apresenta-se muito fraturada.	0,7	Espessura com cerca de 220-250 m; inclinação média 14° (min. 4° e máx. 34°).	0,8	2,7 (Elevada)
Calcários margosos e margas de Fórnea (J <sup>1-2</sup> <sub>Fo</sub> )	Margas e calcários margosos.	0,4	Grumosa; <i>wackstones</i> ; biomicritos a biosparitos/ <i>grainstone</i> ; <i>packstones</i> a <i>grainstones</i> .	Menos de 10% de grãos > 2mm/Mais de 10% de grãos > 2mm; Presença de matriz microcristalina carbonatada; Grãos sem contato/ausência de matriz microcristalina carbonatada e grãos em contato. Porosidade pobre a razoável (avaliação pelo tipo de litologia e textura).	0,7	Sucessão dominada por camadas finas a médias, centimétricas a decimétricas, por vezes sem organização rítmica. A 80 m do topo ocorrem corpos biostrómicos de espessura métrica. Os 50 m superiores são dominados por calcários micríticos.	0,7	Espessura cerca máxima com cerca de 220-250 m; inclinação média 33° (min. 19° e máx. 58°).	0,5	2,3 (Moderada)

Camadas de Coimbra (J <sup>1</sup> <sub>Co</sub> )	Dolomitos	0,5	<i>Wackstones a grainstones.</i>	Menos de 10% de grãos > 2mm/Mais de 10% de grãos > 2mm; Presença de matriz microcristalina carbonatada; Grãos sem contato/ausência de matriz microcristalina carbonatada e grãos em contato. Porosidade pobre a razoável (avaliação pelo tipo de litologia e textura).	0,7	Estratificação entrecruzada e dolomitos com laminação paralela ou ondulada, interstratificados com pelitos.	0,4	Espessura com cerca de 60 m. (camadas com inclinações verticais ou ligeiramente invertidas).	0,1	1,7 (Moderada)
Dolomitos em plaquetas (J <sup>1</sup> <sub>pi</sub> )	Calcários dolomíticos	0,7	<i>Mudstone</i>	Calcários dolomíticos micríticos. Porosidade pobre (avaliada com base no tipo de litologia).	0,2	Camadas com espessura centimétrica a decimétrica.	0,1	Espessura com cerca de 30-40 m.	0,2	1,2 (Baixa)
Margas de Dagorda (J <sup>1</sup> <sub>Da</sub> )	Margas arenosas, argilas gipsíferas e salíferas. Intercalações de calcários dolomíticos.	0,1	Fácies arenosas, pelíticas e <i>Mudstones</i> para as carbonatadas.	Porosidade pobre (avaliada com base no tipo de litologia).	0,1	250-320 m (membro dolomítico, essencialmente dolomítico ou margo-dolomítico com pelitos vermelhos e/ou acinzentados e evaporitos); 60-850 m (membro salífero/dolomítico, predominantemente dolomítico e/ou calco-margoso e margoso rico de evaporitos - anidrite e halite); 290-800 m (membro salífero, caracterizado pelo domínio acentuado de halite, por vezes interstratificada com margas dolomíticas e/ou pelitos margosos e anidrite); A partir de cerca de 1000 m (ocorrência de "Dolomitos em plaquetas"); 1600-1200 m (sais evaporíticos com intercalações de dolomito singenético evaporítico e gesso); ~3000-1600 m (espessa série salífera com frequentes intercalações argilosas, também salíferas, contendo inclusões de anidrite);	0,1	Formação subjacente aos calcários do Jurássico com grande espessura, >3000 m, segundo sondagem "São Mamede 1".	0,4	0,7 (Muito baixa)
Rochas eruptivas	Doleritos	0	-	Porosidade pobre (avaliada com base no tipo de litologia).	0	Associadas a fraturas ou descontinuidades.	0,8	-	0	0,8 (Muito baixa)



**Quadro 9** - Suscetibilidade à carsificação das unidades litostratigráficas da área de estudo e correspondência com as formações propostas por AZERÊDO (2007), Folha 27-A do Instituto Geológico e Mineiro (1998) e MANUPPELLA *et al.* (2000). Adaptado de AZERÊDO (2007).

Cronostratigrafia		Designação AZERÊDO (2007)		Cartografia Geológica (Folha 27-A) e MANUPPELLA <i>et al.</i> (2000)	Suscetibilidade à Carsificação	
Período e Época	Idade	Formações	Membros	Formações	Nível qualitativo	
Holocénico	-	-	-	Aluviões (a); Formação detrítica e <i>terra rossa</i> do Maciço Calcário Estremenho (A)	Muito baixa	
Jurássico Superior	Kimmeridgiano	-	-	Camadas de Alcobaça (J <sup>3</sup> <sub>Al</sub> )	Muito baixa	
	Oxfordiano/Kimmeridgiano	Formação de Cabaços	-	Camadas de Cabaços e de Montejunto (J <sup>3</sup> <sub>CM</sub> )	Baixa	
Jurássico Médio	Caloviano	Formação de Santo António-Candeeiros	Membro de Moleanos	Calcários de Moleanos (J <sup>2</sup> <sub>Ml</sub> )	Elevada	
	Batoniano	Superior	Formação de Serra de Aire		Calcários micríticos de Serra de Aire (J <sup>2</sup> <sub>SA</sub> )	Muito elevada
		Inferior	Formação de Santo António-Candeeiros	Membro de Codaçal	Calcários bioclásticos de Codaçal (J <sup>2</sup> <sub>Co</sub> )	Elevada
	Bajociano	Superior	Formação de Chão das Pias	Calcários de Vale da Serra	Calcários de Chão das Pias (J <sup>2</sup> <sub>CP</sub> )	Muito elevada
	Bajociano Inferior/Aaleniano		Formação de Barranco do Zambujal	-	Margas e Calcários margosos de Zambujal (J <sup>2</sup> <sub>ZA</sub> )	Elevada
			Formação de Fórnea	-	Calcários margosos e margas de Fórnea (J <sup>1-2</sup> <sub>Fo</sub> )	Moderada
Jurássico Inferior	Sinemuriano?/ Pliensbachiano e Toarciano					
	Sinemuriano	Formação de Coimbra	Membro dolomítico	Camadas de Coimbra (J <sup>1</sup> <sub>Co</sub> )	Moderada	
	Hetangiano		-	-	Dolomitos em plaquetas (J <sup>1</sup> <sub>pi</sub> )	Baixa
		-	-	Margas de Dagorda (J <sup>1</sup> <sub>Da</sub> )	Muito baixa	
Cretácico Inferior	-	-	-	Rochas eruptivas (doleritos)	Muito baixa	



**Figura 17** - Mapa da suscetibilidade à carsificação para as unidades litostratigráficas no sector setentrional do Planalto de Santo António.

### 6.2.2. Densidade da fraturação

Incluída na estrutura geológica, a fraturação na área de estudo marca decisivamente a importância dos processos de carsificação, sobretudo no modo como se faz a infiltração e a circulação das águas no maciço. O sector setentrional do Planalto de Santo António representa uma unidade morfoestrutural muito bem individualizada na paisagem, que é parte integrante de uma vasta superfície balançada para SE, é nesta localização delimitada pelas falhas da Costa de Alvados (a N e NE) e pela falha da Costa da Mendiga (a W) que, ao convergirem neste sector, não só o elevam relativamente, aumentando a energia do relevo, como densificam a rede de fraturação, ampliando os caminhos da água para o interior (RODRIGUES, 1998).

Genericamente, as falhas referidas no parágrafo anterior possuem orientação submeridiana, no caso das falhas da Mendiga, e sensivelmente NW-SE no caso das falhas de Alvados-Minde (mapa da Figura 18). Existe ainda um conjunto denso de falhas que recorta o sector do Planalto de Santo António, umas têm orientação aproximada NW-SE a E-W e outras com orientação submeridiana. As primeiras são frequentemente injetadas por rochas filonianas doleríticas (RODRIGUES, 1998). A distribuição das diaclases e lineamentos identificados por CARVALHO (2013, 2018) aparenta ser bastante desigual e a grande densidade localiza-se no sector setentrional do planalto de S. António, a este e oeste de S. Bento. Verificamos também que as formações do Batoniano e Bajociano são as que manifestam a maior densidade da fraturação.

Face ao exposto no subcapítulo 3.2.2 consideramos as áreas com maior potencial endocársico as que apresentam maior densidade espacial de fraturação, quer sejam falhas, diaclases e/ou simples lineamentos, e a presença de zonas de interseção entre elas, que indicam claramente áreas com maior capacidade de infiltração das águas em profundidade e a possibilidade de orientarem o desenvolvimento das cavidades.

O cálculo da densidade da fraturação foi efetuado através da ferramenta *Line Density* do *ArcGIS*, com a densidade quantificada em Km de fratura por Km<sup>2</sup>. Tendo em conta que a maior ou menor propensão à infiltração das águas está associada ao tipo de fratura, utilizámos critérios ligeiramente diferentes para o cálculo da densidade entre os grupos: “falhas” (Falha, Falha oculta e Falha Provável) e “diaclases e lineamentos”. Na ferramenta *Line Density* do *ArcGIS*, aplicámos para o grupo “falhas” um raio de pesquisa de 200 m, assumindo uma maior concentração da infiltração das águas; no grupo “diáclases e lineamentos” aplicámos um raio de pesquisa de 600 m, assumindo uma concentração das águas mais difusa.

A aplicação da metodologia descrita no parágrafo anterior originou dois mapas em formato *raster*. O mapa final da densidade de fraturação foi obtido através da aplicação da Fórmula 6, que não é mais que uma média ponderada entre os valores das densidades dos grupos de fraturas acima definidos. Atribuímos três vezes mais importância ao grupo “falhas” por considerarmos que representa uma maior propensão para a infiltração das águas, assim como, uma maior propensão para concentração dessa infiltração.

$$\text{Densidade de fraturação} = \frac{1}{2} [D_{\text{diaclases e lineamentos}} + (D_{\text{falhas}} * 3)] \quad (6)$$

$D_{\text{diaclases e lineamentos}}$  é a densidade espacial do grupo “diaclases e lineamentos”;  $D_{\text{falhas}}$  é a densidade espacial do grupo “falhas”.

No sentido de facilitar a comparação par a par no PAH, as cinco classes obtidas pelo método de quebras naturais foram ponderadas com a escala: Muito baixa (0 – 1,9), Baixa (1,9 – 4,5), Moderada (4,5 – 7,6), Elevada (7,6 – 11,7) e Muito elevada (11,7 – 19,3) (ver quadro 6).



**Figura 18** - Mapa da densidade da fraturação com a localização de fraturas e lineamentos no sector setentrional do Planalto de Santo António.



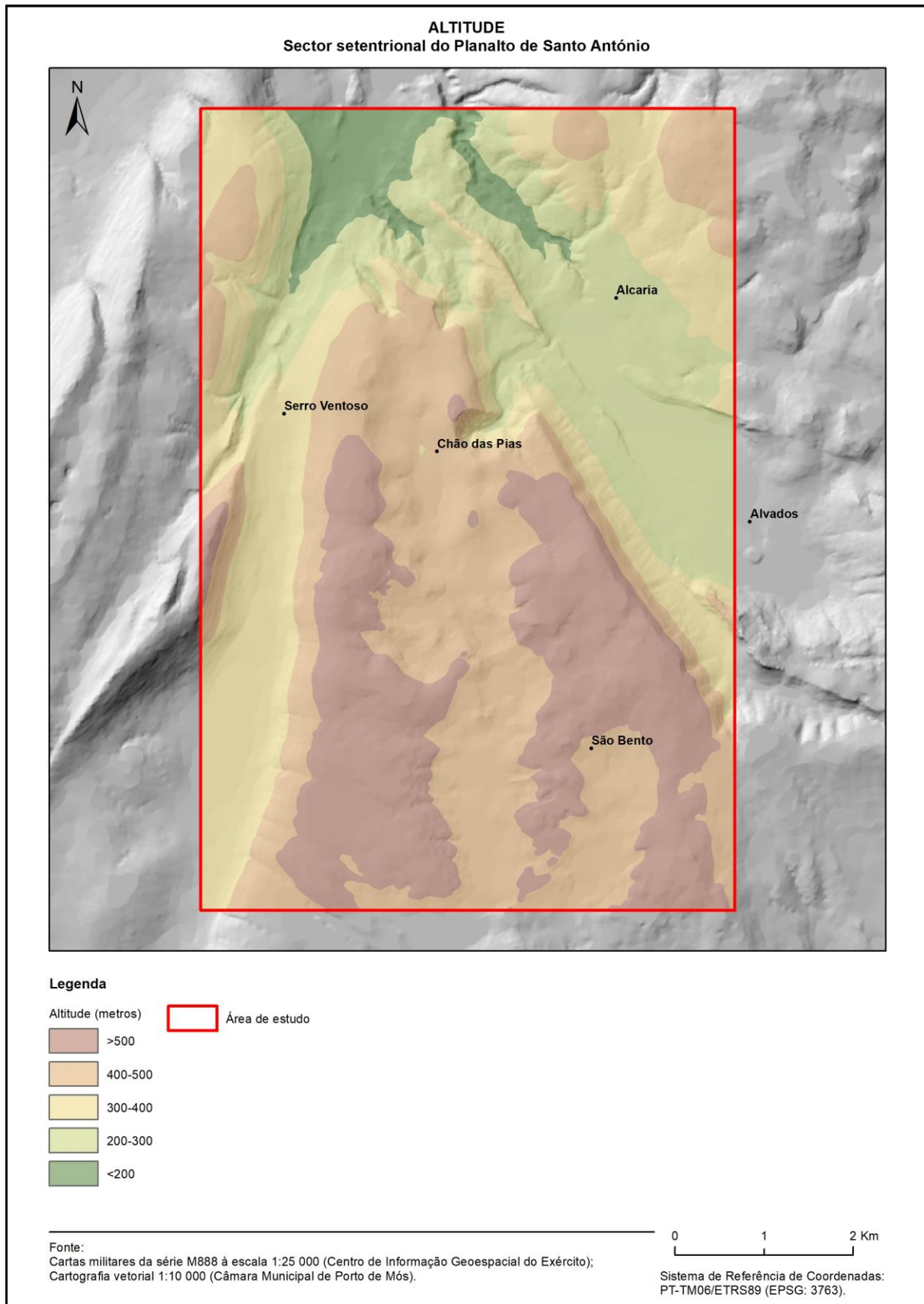
### 6.2.3. Energia do relevo

A hipsometria da área de estudo apresenta diferenças de altitudes significativas. Como referido anteriormente, existem três sectores de maior altitude, em relação com as unidades morfoestruturais proeminentes no Maciço Calcário Estremenho: com altitudes próximas e superiores a 500 m, a Serra dos Candeeiros (na parte oeste e NW da área de estudo); com altitudes entre 400 e 585 m, o sector setentrional do Planalto de Santo António de forma aproximadamente triangular; sector NE com altitudes na classe 400-500m, já no Planalto de S. Mamede. O sector do Planalto de Santo António é ladeado por dois sectores que são parte das depressões de Alvados (entre 200-300 m) e da Mendiga (300-400 m), a este e a oeste, respetivamente. O sector mais a norte corresponde a parte do vale tifónico de Rio Maior-Porto de Mós e regista altitudes inferiores a 300 m (mapa da Figura 19).

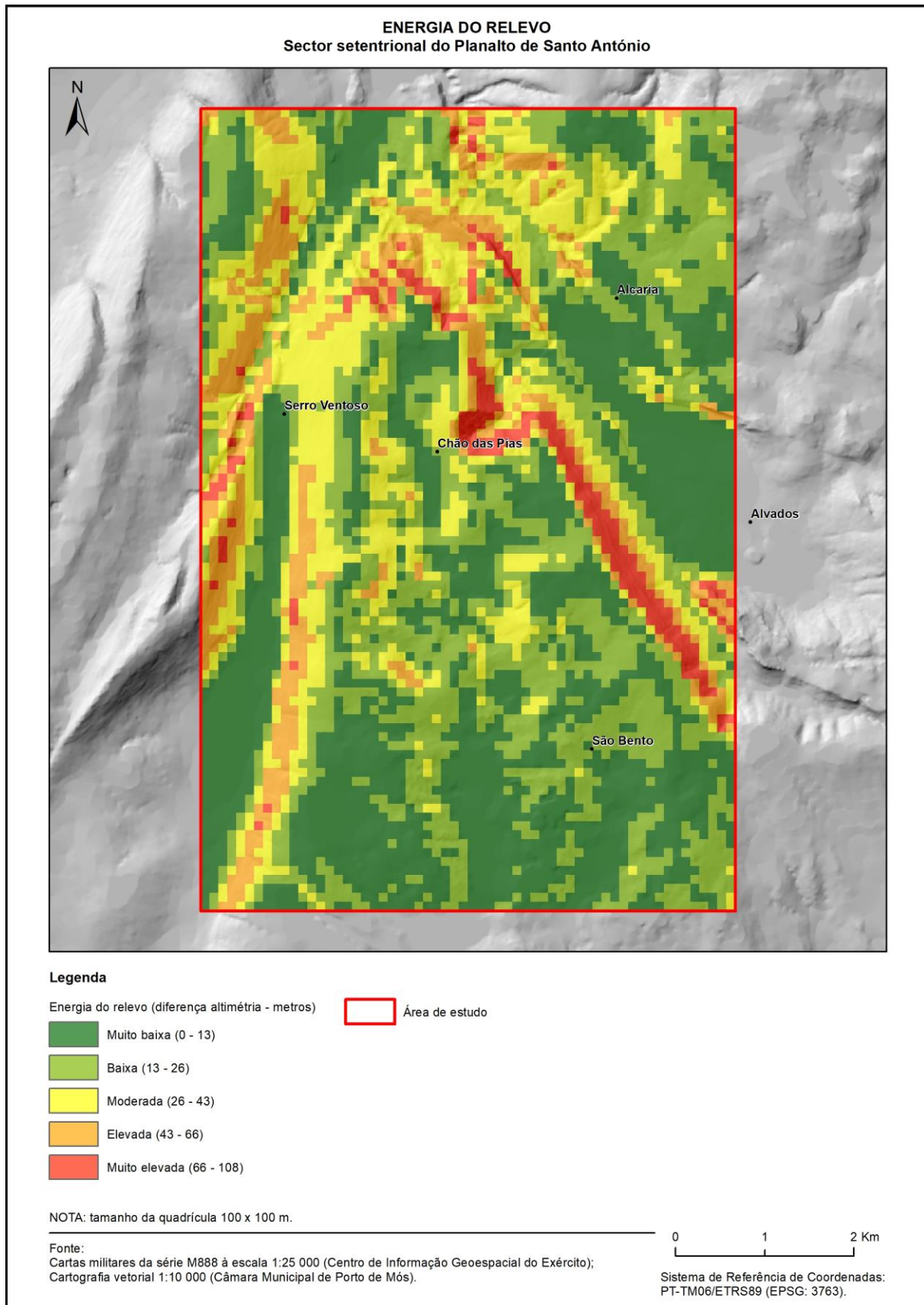
Para a avaliação do potencial endocársico partimos do princípio de que a diferença altimétrica funciona como uma força motriz (energia potencial) que é proporcional à diferença altimétrica de uma determinada área. Esta força influencia a capacidade hidrodinâmica das águas que percorrem o interior do maciço rochoso, com claras influências no desenvolvimento da carsificação. O conceito de energia do relevo, entendido como a diferença entre as altitudes máxima e mínima numa área pertencente a uma grelha regular (BAIONI & TRAMONTANA, 2017) (ver subcapítulo 3.4), materializa de certa forma o papel da topografia como força motriz na carsificação. Desta forma, foi construído um mapa de energia do relevo através da ferramenta *Block Statistics* do *ArcGIS* com uma grelha composta por quadrículas 100 m por 100 m (Figura 20), resolução espacial que considerámos adequada face à irregularidade do relevo na área de estudo. Notámos que em quadrículas superiores a 100 m os valores respeitantes a sectores mais acidentados ficavam frequentemente sobrepostos a sectores mais planos no Modelo Digital de Elevação (MDE), e nestes últimos, a diferenciação espacial dos valores era inferior. Por outro lado, uma quadrícula mais pequena aproximava este mapa ao conceito de mapa de declives “tradicional”, ainda que a medida deste último seja diferente (graus), a diferença altimétrica e a distância horizontal (*e.g.*, um lado da quadrícula), está na base do cálculo do declive [=  $\text{Tan}^{-1}$  (diferença altimétrica/distância horizontal)].

Procedemos à classificação das diferenças altimétricas em metros para cinco classes através do método das quebras naturais e atribuímos as ponderações: Muito baixa (0 - 13), Baixa (13 - 26), Moderada (26 - 43), Elevada (43 - 66) e Muito elevada (66 - 108) (ver quadro 6). No mapa com a energia do relevo é possível verificar que as áreas de maior energia são, *grosso modo*, coincidentes com a parte superior das vertentes mais íngremes (*e.g.*, Costa de Alvados) sendo, aqui, em paridade de outras condições, a carsificação mais intensa.





**Figura 19** - Mapa hipsométrico do sector setentrional do Planalto de Santo António.



**Figura 20** - Mapa da energia do relevo no sector setentrional do Planalto de Santo António.

#### 6.2.4. Ocupação do solo

Para a incorporação da ocupação do solo no PAH construímos um mapa com as classes de ocupação do solo, pertencentes à Carta de Ocupação do Solo (COS<sup>26</sup>) de 2018: 1. Territórios artificializados, 2. Agricultura, 3. Pastagens, 5. Florestas, 6. Matos e 7. Espaços descobertos ou com pouca vegetação (Figura 21). Verificamos que na área de estudo predominam os “Matos” – 38%, o que é perfeitamente compatível com a típica vegetação cársica, *garrigue*, vegetação arbustiva aberta, com características xerófitas, à qual pertencem espécies como o alecrim (*Rosmarinus officinalis L.*), o rosmaninho (*Lavandula Stoechas, L.*), o sargaço (*Cistus monspeliensis L.*), a urze (*Erica arbórea L.*), entre outras (MARTINS, 1949). A distribuição dos “Matos” coincide, em parte, com as áreas de relevo mais acidentado (*e.g.*, vertentes). Apesar de o carso estar, no imaginário coletivo, geralmente associado a uma “paisagem de pedra”, este ambiente não deixa completamente de ter condições para a existência de vegetação arbustiva mais desenvolvida ou mesmo de arbórea, de tipo *maquis* ou, mesmo, de prática da agricultura, nestes casos nos locais em que a presença de depósitos de cobertura siliciclástica favorece a presença de solos e a retenção superficial da água.

As áreas de “agricultura” representam 27% da ocupação do solo e coincidem com as áreas mais planas, tal como as áreas de “Pastagens” (14%). As “florestas” (13%) têm uma distribuição muito heterogénea, podendo pertencer ao *maquis*, como fez notar MARTINS (1949), que refere a existência da mais autêntica mancha de *maquis* de todo Maciço Calcário Estremenho no Planalto de Santo António (na qual pertence o medronheiro - *Phillyria Tinus L.*), ou podendo ser constituídas por pinheiros (*Pinus pinaster Ait.*) e eucaliptos (*Eucalyptus globulus Labill.*) (MARTINS, 1949). Os “Espaços artificializados” ocupam apenas cerca de 7% da área de estudo, sendo compostos por edificado com vista à habitação, indústria, instalações agrícolas e pedreiras. Os “Espaços descobertos ou com pouca vegetação” têm uma representação residual (0,14%).

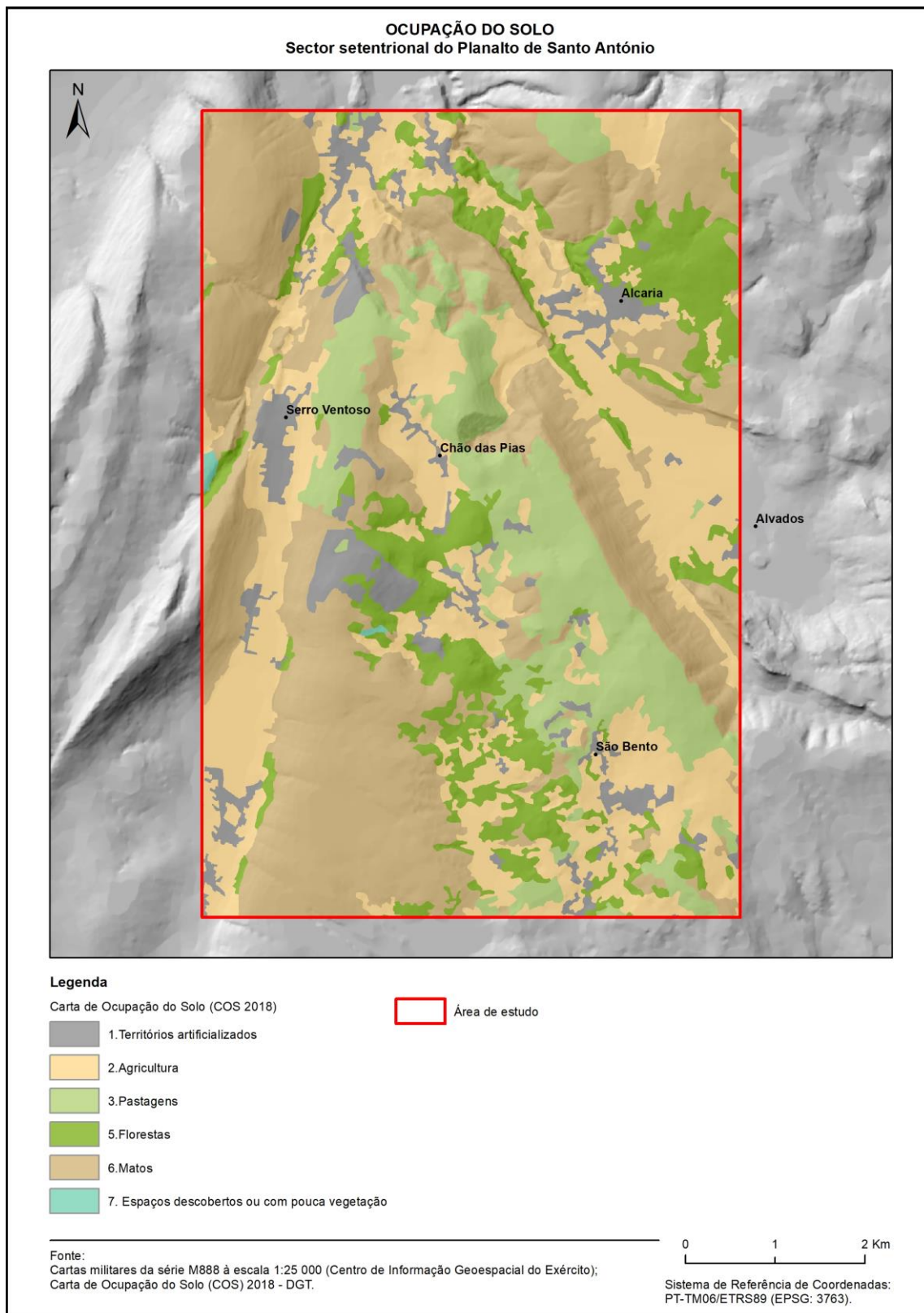
O tipo de ocupação do solo também influencia a carsificação. Em áreas cobertas por solos e vegetação existe uma acidificação das águas meteóricas e a sua percolação é mais lenta, o que potencia a dissolução das rochas carbonatadas (subcapítulo 3.4). Consideramos que a dissolução é potenciada em áreas de floresta, nas áreas ocupadas por pastagens e por campos agrícolas. Nas áreas de mato e nas áreas descobertas a dinâmica de carsificação é mais próxima à do carso nu, pois a influência destas ocupações de solo nas propriedades químicas é reduzida (ainda que nas áreas de mato exista alguma influência). Nos territórios artificializados existe maior impermeabilização do solo o que não potencia a carsificação, de qualquer modo, esta última ocupação do solo apenas pode ter importância no

---

<sup>26</sup> Foram adotadas as classes de nível de detalhe 1 da COS por serem facilmente comparáveis entre si e por descrevem o tipo de ocupação do solo de forma simples.



desenvolvimento da carsificação atual e não nas formas endocársicas desenvolvidas ao longo do tempo geológico sem qualquer influência da ação antrópica.



**Figura 21** - Mapa de ocupação do solo no sector setentrional do Planalto de Santo António, segundo a Carta de Ocupação do Solo 2018.

### 6.3. Construção do modelo cartográfico e respetiva verificação

Importava agora avaliar a capacidade preditiva do modelo cartográfico de modo a legitimar a sua representação cartográfica. Para tal, a área de estudo foi dividida numa área de treino e numa área de teste, representando 1/3 e 2/3 da área total, respetivamente (Figura 22). Para a definição das áreas de treino e de teste também tivemos em conta a representatividade da localização das entradas das cavidades inventariadas. Após a verificação dos resultados para a área de treino e área de teste (segundo o fluxograma metodológico da Figura 1), assumimos as ponderações dos Quadros 10 a 14.

A avaliação do modelo cartográfico baseou-se na análise das curvas de sucesso (ou predição) para as duas áreas referidas (treino e teste), assim como para a totalidade da área de estudo (= área total). A curva para a totalidade da área de estudo foi representada graficamente em termos percentuais, com o potencial endocársico por ordem decrescente no eixo das abcissas e no eixo das ordenadas uma função de distribuição cumulativa das cavidades inventariadas (Figura 23). Caso a “curva” se traduza numa linha diagonal, com origem no valor máximo do potencial endocársico, o grau de sucesso é determinado pelo acaso e não existe uma relação de dependência entre as variáveis. Uma rápida inflexão da curva no sentido positivo à referida diagonal indica que o modelo tem um melhor desempenho; se a curva infletir no sentido negativo o modelo tem fraco desempenho, sendo também considerado inaceitável (GHUNG & FABBRI, 2003; OLIVEIRA, 2012).

O cálculo da Área Abaixo da Curva de Sucesso, doravante designada por AAC, permite a avaliação quantitativa da capacidade preditiva do modelo (Fórmula 7). Os valores de AAC variam entre 0% e 100% (ou entre 0 e 1), sendo que, quanto mais próximos de 100%, maior a capacidade preditiva do modelo. O valor de 50% coincide graficamente com uma reta diagonal que representa uma capacidade preditiva casual, como referido anteriormente. Os valores abaixo de 50% representam uma capacidade preditiva pior que o aleatório e, neste caso, o respetivo modelo não pode ser considerado aceitável (BI & BENNETT, 2003).

$$AAC = \sum_{i=1}^n \left[ (LS_i - L_i) * \frac{a_i + b_i}{2} \right] \quad (7)$$

$LS_i - L_i$  é a amplitude de cada classe;  $a_i$  é o valor da ordenada correspondente a  $L_i$ ;  $b_i$  é o valor da ordenada correspondente a  $LS_i$ .

Na definição de valores de AAC que permitam a avaliação da capacidade preditiva do modelo cartográfico optamos pelos valores adotados em trabalhos no âmbito da suscetibilidade de movimentos em vertentes, nomeadamente em GUZZETI *et al.* (2005) e OLIVEIRA (2012). Valores de

AAC entre 75% e 80% correspondem a um modelo aceitável, valores entre 80% e 90% indicam um modelo muito bom e valores superiores a 90% representam um modelo excelente.

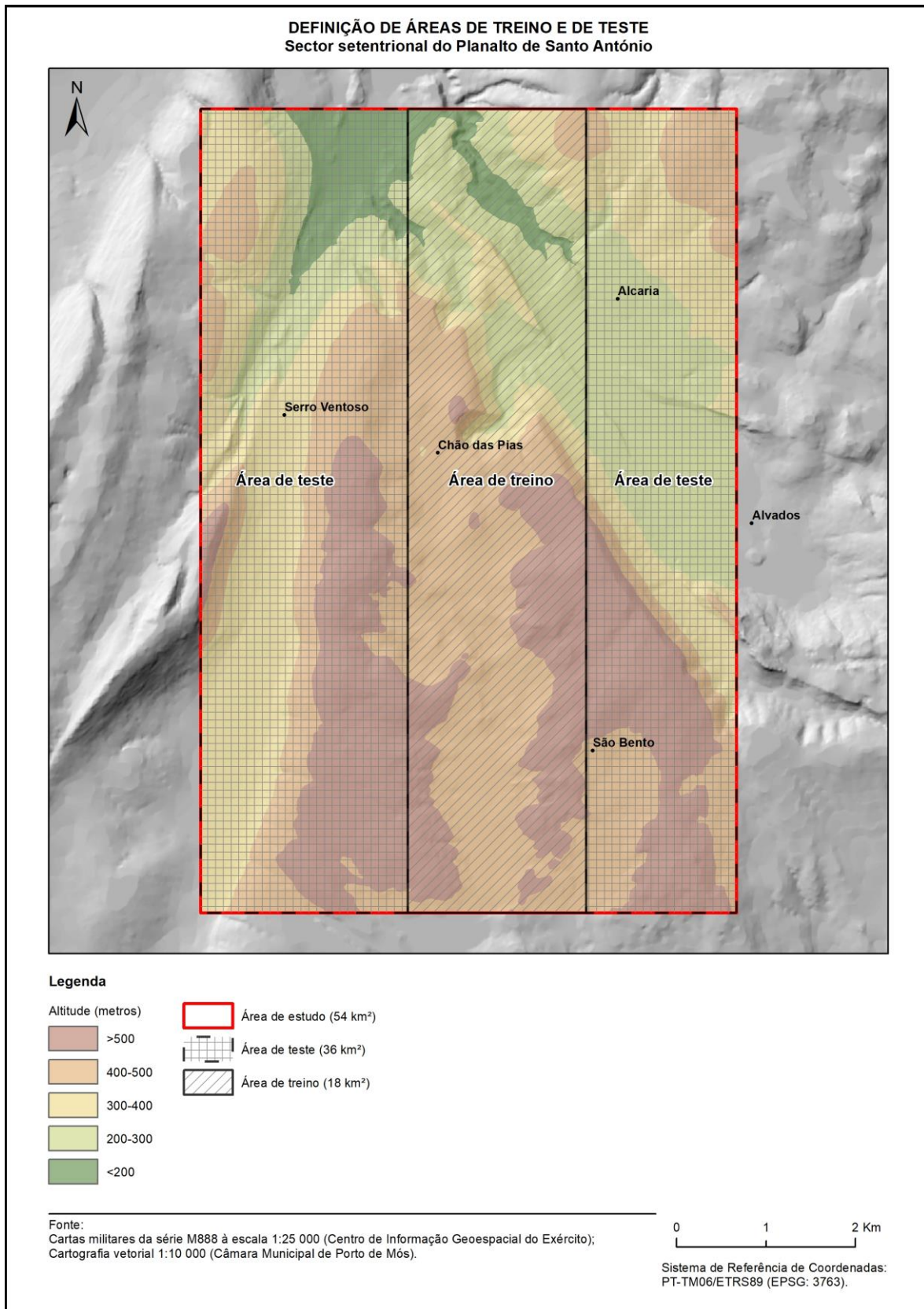


Figura 22 - Mapa com a definição das áreas de treino e teste na área de estudo.



Seguindo o fluxograma da Figura 1, desenvolvemos o modelo preditivo de forma iterativa até obter valores de AAC aceitáveis. Os melhores resultados alcançados apontam para os seguintes valores de AAC: área de treino – 81,4%; área de teste – 88,0%; área de estudo – 82,5%. Estando os valores de AAC entre 80% e 90%, podemos tipificar o modelo como muito bom. Ao observar a curva de sucesso referente à área de estudo notamos que perto de 10% da área classificada com potencial endocársico “Muito elevado” (91% a 100% no gráfico da Figura 23) explica perto de 65% das áreas com cavidades inventariadas e aproximadamente 32% da área com menor potencial endocársico (“Baixo” e “Muito baixo”) explica apenas cerca de 5% das áreas com cavidades. No entanto, importa salientar que a descoberta de novas cavidades poderá alterar de forma significativa os resultados agora apresentados.

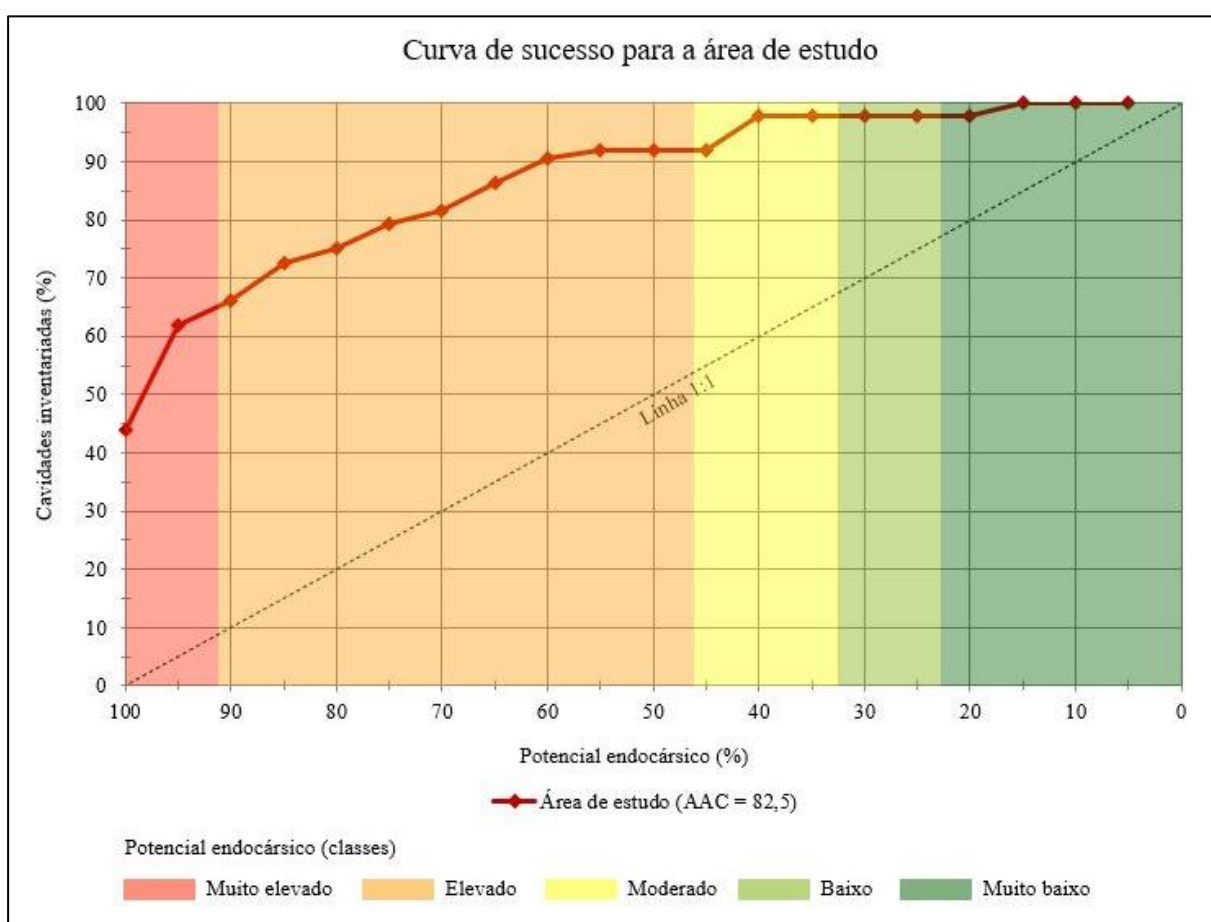


Figura 23 - Curva de sucesso para a área de estudo.

Os resultados obtidos pela comparação par a par entre as classes dos diferentes fatores considerados encontram-se nos quadros 10 a 13. No quadro 14 apresentam-se os resultados da comparação par a par dos fatores de carsificação. Todas as tabelas estão consistentes, pois registam um  $RC < 0,10$ . O  $W_i$  dá-nos a ordem de prioridade para cada classe associada a um fator e entre fatores. Verificamos que a ordem de prioridade dos fatores foi a seguinte: (1) unidades litostratigráficas, (2) densidade da

fraturação, (3) energia do relevo e (4) ocupação do solo. De salientar que as unidades litostratigráficas foram avaliadas anteriormente quanto à sua suscetibilidade à carsificação (Quadro 8).

Na ponderação dos fatores adotados tivemos também em consideração a sua importância associada à escala de análise. Deste modo, procurámos avaliar esses fatores em função da importância que têm para a carsificação subterrânea à escala 1:10 000. Na ponderação tivemos em conta a importância que determinadas características podem ter à referida escala. Por exemplo, a porosidade primária (aparente) das rochas carbonatadas pode ser importante para a carsificação do maciço rochoso à escala do pormenor ou mesmo local (metros)<sup>27</sup>, mas à escala regional pode perder a importância devido à existência de fatores mais importantes a esta escala (*e.g.*, a fraturação).

**Quadro 10** - Cálculo da ponderação para o fator “Unidades litostratigráficas” através do método da comparação par a par.

<b>Unidades litostratigráficas (SC*)</b>	Muito elevada	Elevada	Moderada	Baixa	Muito baixa	<i>Wi</i>
Muito elevada	1	2	5	7	9	0,46
Elevada	1/2	1	4	6	8	0,32
Moderada	1/5	1/4	1	3	6	0,13
Baixa	1/7	1/6	1/3	1	3	0,06
Muito baixa	1/9	1/8	1/6	1/3	1	0,03
RC = 0,055						<i>*suscetibilidade à carsificação</i>

**Quadro 11** - Cálculo da ponderação para o fator “Densidade da fraturação” através do método comparação par a par.

<b>Densidade de fraturação</b>	Muito elevada	Elevada	Moderada	Baixa	Muito baixa	<i>Wi</i>
Muito elevada	1	2	4	6	9	0,47
Elevada	1/2	1	3	4	7	0,30
Moderada	1/4	1/3	1	2	3	0,12
Baixa	1/6	1/4	1/2	1	1	0,07
Muito baixa	1/9	1/7	1/3	1	1	0,05
RC = 0,013						

<sup>27</sup> A avaliação qualitativa da porosidade e outras características das rochas foram assumidos ao nível da unidade litostratigráfica, porque esta é que se encontra cartografada.

**Quadro 12** - Cálculo da ponderação para o fator “Energia do relevo” através do método comparação par a par.

Energia do relevo	Muito elevada	Elevada	Moderada	Baixa	Muito baixa	$W_i$
Muito elevada	1	1	2	3	4	0,32
Elevada	1	1	2	3	4	0,32
Moderada	1/2	1/2	1	2	3	0,19
Baixa	1/3	1/3	1/2	1	1	0,09
Muito baixa	1/4	1/4	1/3	1	1	0,08
RC = 0,007						

**Quadro 13** - Cálculo da ponderação para o fator “Ocupação do solo” através do método comparação par a par.

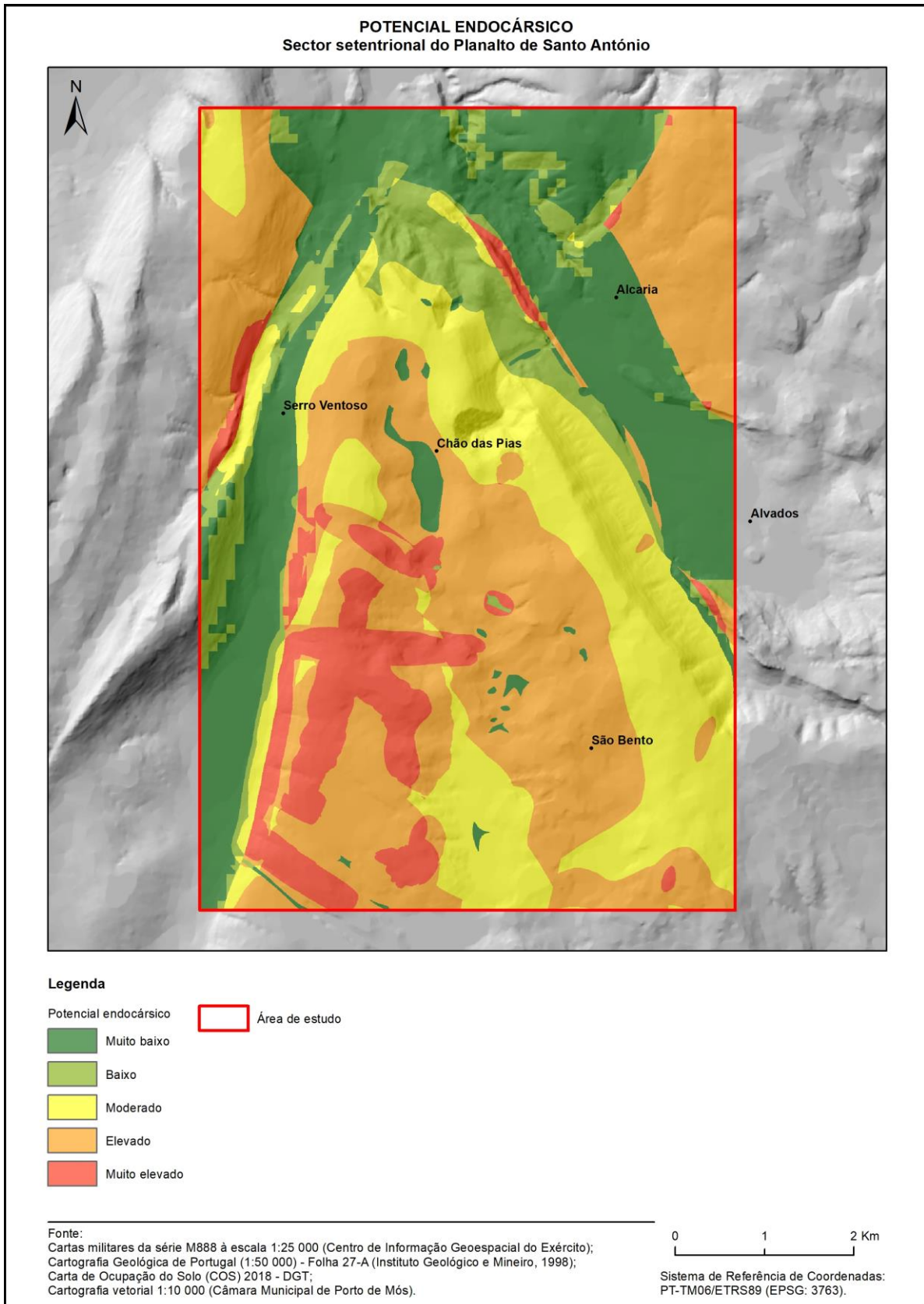
Ocupação do solo	Florestas	Pastagens	Agricultura	Matos	Espaços descobertos ou com pouca vegetação	Territórios artificializados	$W_i$
Florestas	1	2	3	3	3	8	0,35
Pastagens	1/2	1	1	2	3	8	0,22
Agricultura	1/3	1	1	2	2	6	0,18
Matos	1/3	1/2	1/2	1	1	7	0,11
Espaços descobertos ou com pouca vegetação	1/3	1/3	1/2	1	1	7	0,11
Territórios artificializados	1/8	1/8	1/6	1/7	1/7	1	0,03
RC = 0,035							

**Quadro 14** - Cálculo da ponderação para os fatores de carsificação através do método comparação par a par.

Fatores de carsificação	Unidades litostratigráficas	Densidade da fraturação	Energia do relevo	Ocupação do solo	$W_i$
Unidades litostratigráficas	1	2	4	5	0,49
Densidade da fraturação	1/2	1	3	4	0,31
Energia do relevo	1/4	1/3	1	2	0,13
Ocupação do solo	1/5	1/4	1/2	1	0,08
RC = 0,018					

As camadas de informação geográfica (em formato *raster*), correspondentes a cada fator considerado para modelar o potencial endocársico, foram reclassificadas fazendo coincidir as suas classes com o  $W_i$  normalizado na escala 1 a 101 (de modo a evitar a existência no número 0 em operações de multiplicação). Através da aplicação da Fórmula 5, também com valores de  $W_i$  normalizados na escala 1 a 101 para os fatores de carsificação do Quadro 14, foi possível obter os valores do potencial endocársico. As operações foram realizadas utilizando as ferramentas *reclassify* e *raster calculator* do *ArcGIS*. A representação cartográfica destes valores do potencial endocársico foi organizada em cinco

classes, obtidas pelo método das quebras naturais e ponderadas na seguinte escala: Muito baixo, Baixo, Moderado, Elevado e Muito elevado (Figura 24).



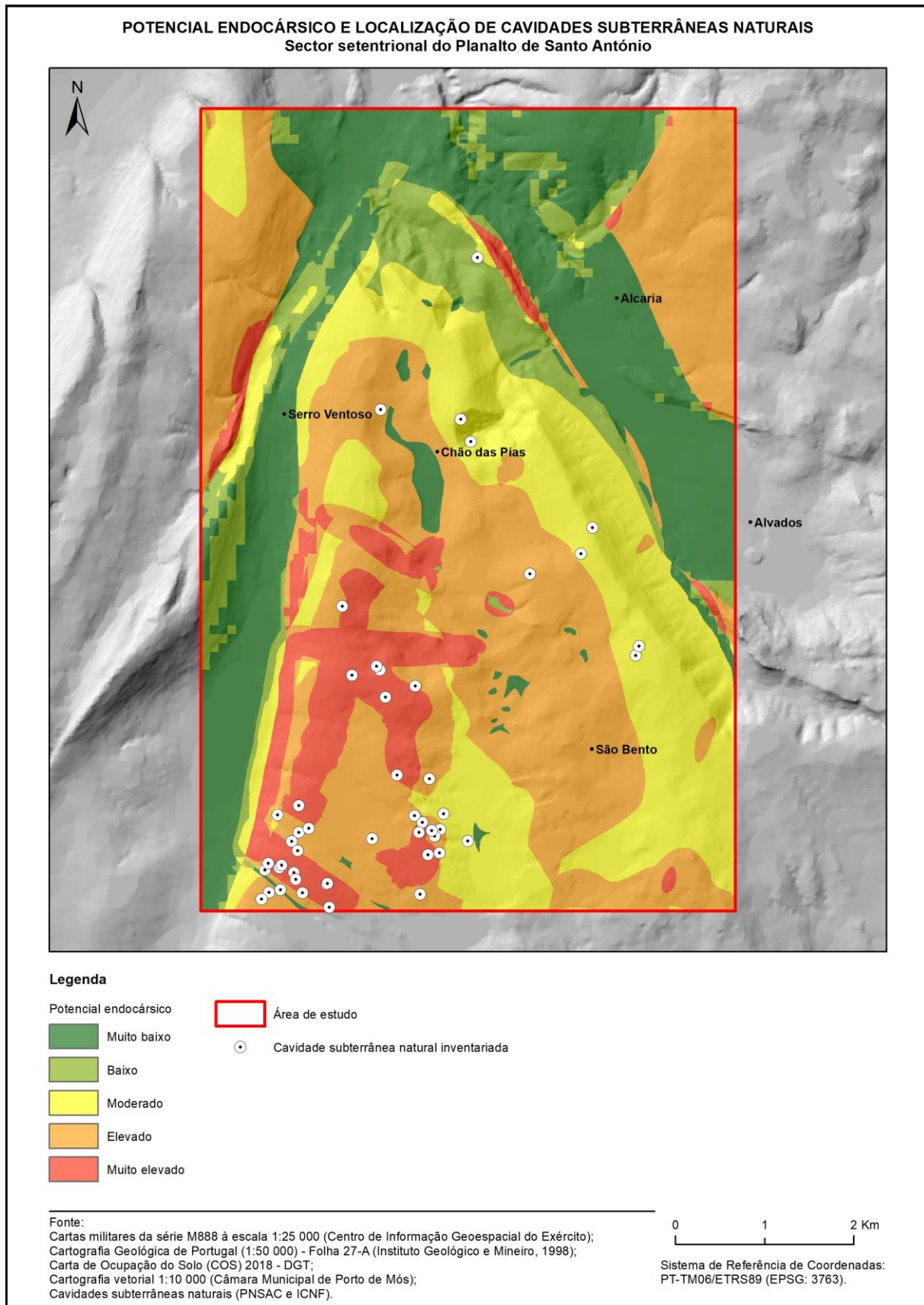
**Figura 24** - Mapa do potencial endocársico no sector setentrional do Planalto de Santo António.

## 7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Da análise do modelo cartográfico desenvolvido para o potencial endocársico da área de estudo, sobreposto pela localização das entradas das cavidades naturais inventariadas (Figura 25), verificamos que as ponderações atribuídas através do PAH são válidas, pois 77% das cavidades coincidem com as classes de potencial endocársico “Elevado” e “Muito elevado” (Figura 26). Não obstante o resultado promissor devemos ter em conta que numa área considerável a NW de São Bento, assim como nos sectores NE e NW da área de estudo, o potencial endocársico também está classificado como “Muito elevado” ou “Elevado” e aqui não existem cavidades subterrâneas naturais inventariadas. Ao tomarmos como válida a presente avaliação podemos afirmar que também poderão existir cavidades nesses sectores. Por outro lado, os dados das cavidades referem-se apenas a localização das entradas/saídas de grutas que podem pertencer a complexos sistemas de galerias subterrâneas. Com dados topográficos que permitissem cartografar o desenvolvimento desses sistemas, e compará-los com o modelo produzido, poderíamos realizar uma análise mais adequada dos resultados alcançados. Outro fator a ter em conta é que o inventário da localização das entradas das cavidades existente diz respeito ao conhecimento atual (pelo menos até fevereiro 2021), sendo que esta distribuição pode ser modificada com a descoberta de novas cavidades e assim condicionar a validade do modelo.

Em complemento aos resultados obtidos na avaliação do modelo (subcapítulo 6.3), considerámos ser pertinente comparar o potencial endocársico com os dados de outro trabalho, de temática similar e realizado na mesma área - CRISPIM (1992, 1995). Como esse trabalho se foca na classificação de unidades litostratigráficas quanto à suscetibilidade à carsificação, apresentamos o gráfico da Figura 27 com a distribuição das cavidades pelas diferentes unidades litostratigráficas utilizadas no nosso modelo. Notamos uma correlação entre as unidades mais suscetíveis à carsificação com a distribuição das cavidades, nomeadamente os Calcários micríticos de Serra de Aire ( $J^2_{SA}$ ) e os Calcários de Chão das Pias ( $J^2_{CP}$ ), que, ocupando 38,2% da área de estudo, contêm cerca de 63% das cavidades conhecidas. Os Calcários margosos e margas de Fórnea ( $J^{1-2}_{Fo}$ ), Margas e Calcários margosos de Zambujal ( $J^2_{ZA}$ ), Calcários bioclásticos de Codaçal ( $J^2_{Co}$ ), que ocupam 31,26% da área, contêm cerca de 35% das cavidades conhecidas. Perante estes dados, confirma-se a propensão para a carsificação das unidades pertencentes ao Jurássico Médio, que são também das classificadas como mais suscetíveis à carsificação (Quadro 9).





**Figura 25** - Mapa do potencial endocársico e localização de cavidades subterrâneas conhecidas no sector setentrional do Planalto de Santo António.



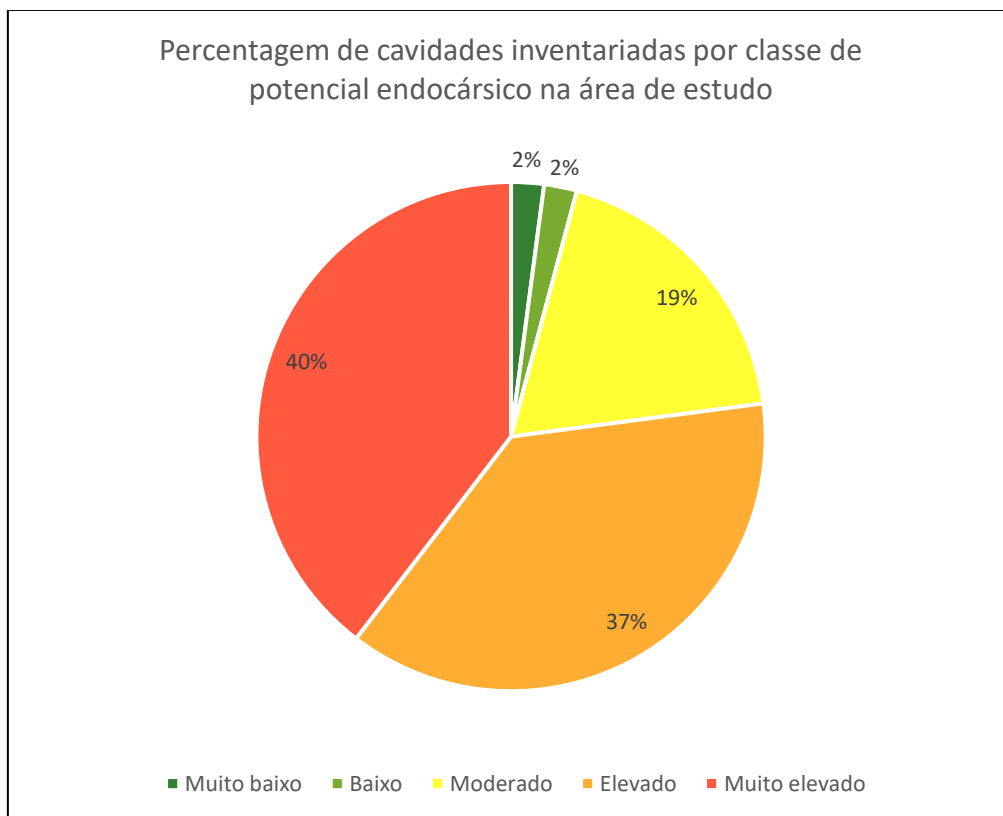


Figura 26 - Percentagem de cavidades subterrâneas por classe de potencial endocársico na área de estudo.

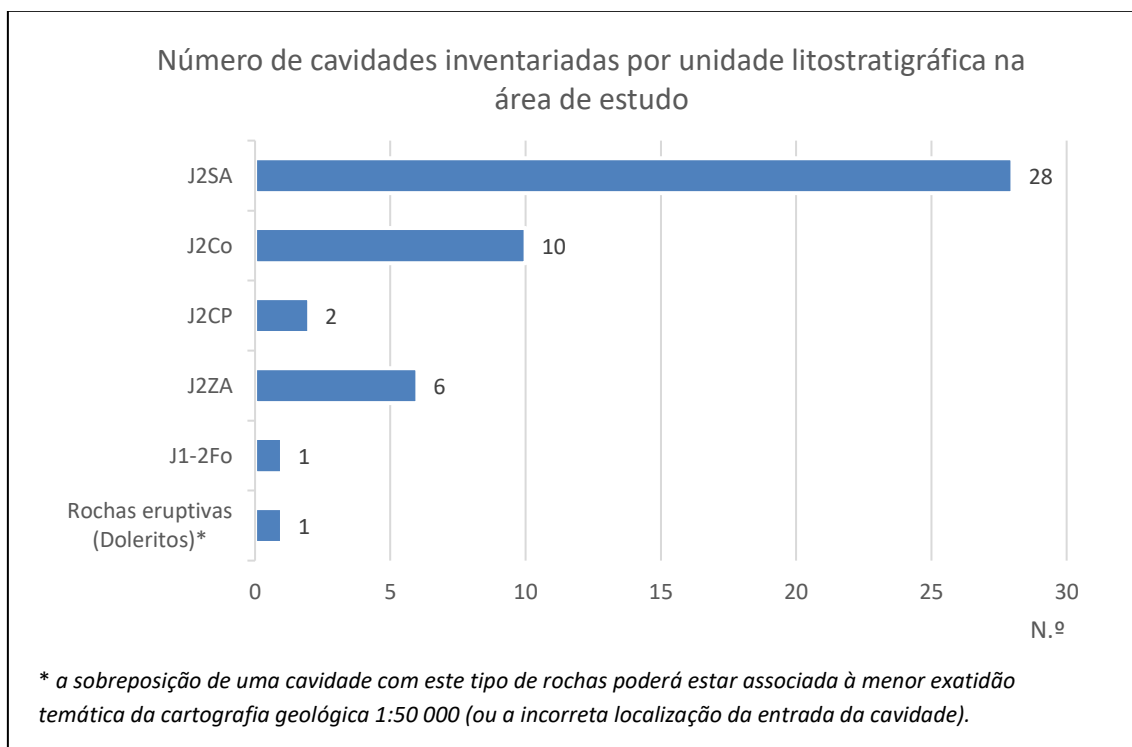


Figura 27 - Número de cavidades subterrâneas inventariadas por unidade litostratigráficas na área de estudo.

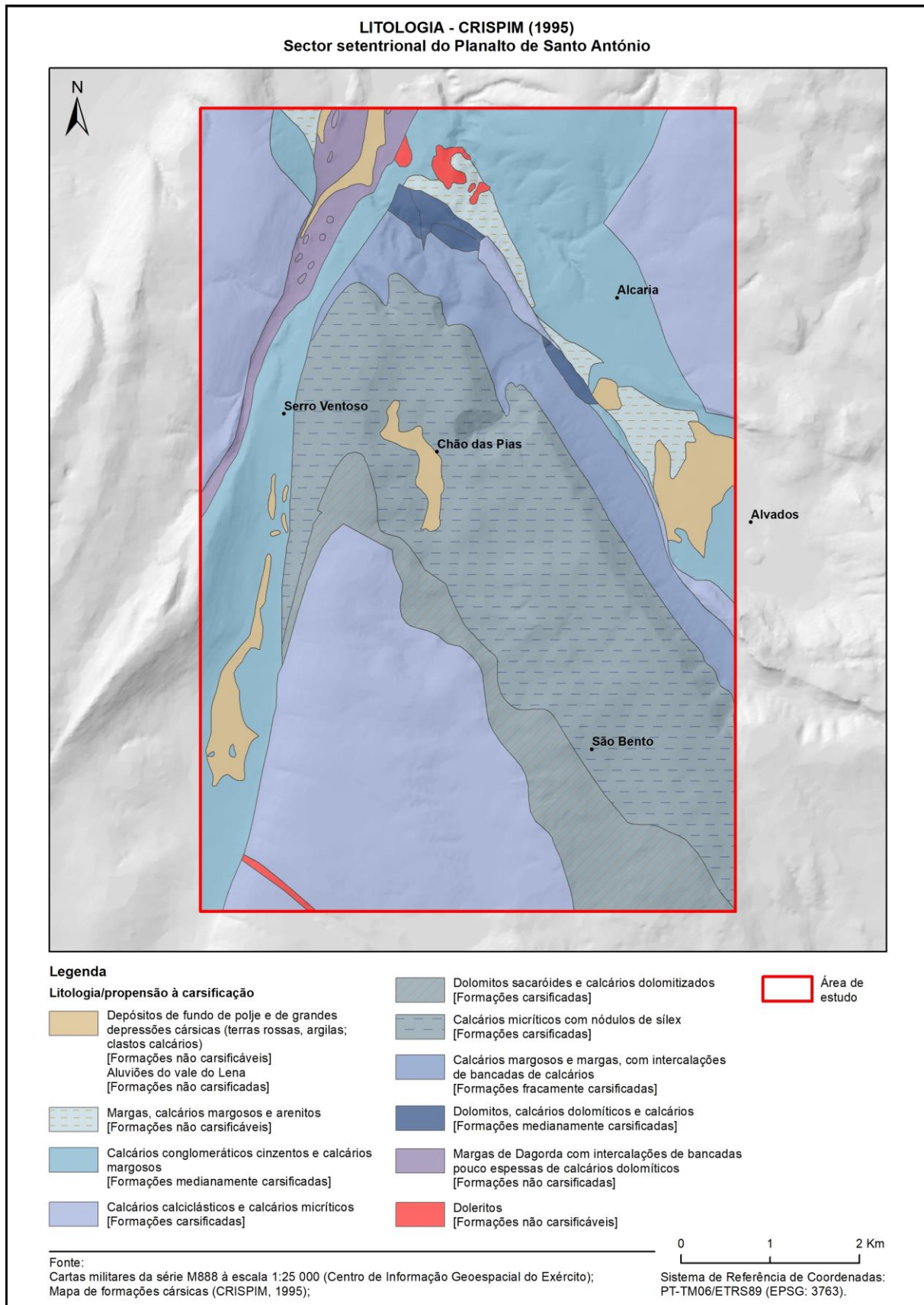
CRISPIM (1992, 1995) realizou uma avaliação das unidades litostratigráficas do Maciço Calcário Estremenho e classificou-as quanto à sua suscetibilidade à carsificação. Julgamos que a comparação dos nossos resultados com os do referido autor é bastante pertinente, pois a sua experiência e conhecimento pormenorizado do Maciço Calcário Estremenho e da sua espeleologia é seguramente uma mais-valia para a avaliação dos nossos resultados. Importa referir que a interpretação própria do autor levou à produção de uma cartografia que difere em parte, em termos de critérios litostratigráficos, da cartografia geológica 1:50 000 (Folha 27-A) e de outros trabalhos que contribuem para a formalização da litostratigrafia regional (AZERÊDO, 2007 – Quadro 7). De qualquer forma, a informação que pretendíamos retirar do seu trabalho está mais relacionada com a localização/distribuição espacial das unidades quanto ao seu grau de carsificação e não tanto pelas designações litostratigráficas por si atribuídas.

Das informações recolhidas em CRISPIM (1992, 1995) agrupámos as unidades litostratigráficas identificadas da seguinte forma (representação cartográfica em mapa da Figura 28):

- **Formações carsificadas:**
  - Formação cársica do Jurássico Médio, termo inferior calcário, do Aaleniano-Bajociano (*Calcários micríticos com nódulos de sílex*);
  - Formação cársica do Jurássico Médio, termo dolomítico, do Bajociano (*Dolomitos sacaróides e calcários dolomitizados*);
  - Formação cársica do Jurássico Médio, termo superior calcário, do Batoniano (*Calcários calciclásticos e calcários micríticos*).
- **Formações medianamente carsificadas:**
  - Formação do Sinemuriano, dolomitos do Sinemuriano s.s. (*Dolomitos e calcários dolomíticos*);
  - Formação do Sinemuriano, calcários do Sinemuriano Superior (*Dolomitos, calcários dolomíticos e calcários*);
  - Formação medianamente carsificada do Oxfordiano (*Calcários conglomeráticos cinzentos e calcários margosos*).
- **Formações fracamente carsificadas:**
  - Formação impermeável do Hetangiano, intercalações calcodolomíticas (*Calcários dolomíticos*);
  - Formação do Sinemuriano Superior médio a Aaleniano (calcomargosa) (*Calcários margosos e margas com intercalações de bancadas de calcários*).

- **Formações não carsificadas:**
  - Formação impermeável do Hetangiano (*Margas de Dagorda com intercalações de bancadas pouco espessas de calcários dolomíticos*);
  - Aluviões do vale do Lena (*Depósitos aluvionares*).
- **Formações não carsificáveis:**
  - Formação impermeável do Kimeridgiano (*Margas, calcários margosos e arenitos*);
  - Depósitos do fundo dos *polje* e grandes depressões cársicas (com clastos calcários), Depósitos do fundo dos *polje* e grandes depressões cársicas (argilosas) e Depósitos do fundo dos *polje* e grandes depressões cársicas (*Terras rossas, argilas com concreções ferruginosas e argilas com areias e seixos siliciosos. Leitões de calhaus de calcário e materiais silto-argilosos*);
  - Doleritos.

No sentido de utilizar a informação cartográfica disponível em CRISPIM (1995) procedemos à sua digitalização para compararmos as áreas com a nossa classificação do potencial endocársico em SIG. O resultado deste exercício encontra-se no Quadro 15. Verificamos que as unidades categorizadas como “Formações carsificadas” coincidem com as nossas classes de potencial endocársico “Muito elevado”, “Elevado” e “Moderado” em 96,91%, 97,95% e 80,63% respetivamente, portanto, o decréscimo do potencial endocársico corresponde a uma tendência de decréscimo da representatividade das “Formações carsificadas”. No potencial endocársico “Baixo” também se mantêm valores coerentes, 30,97% para as “Formações fracamente carsificadas” e 56,46% para as “Formações medianamente carsificadas”. Apenas no potencial “Muito baixo” seria expectável que a representatividade das “Formações não carsificadas” (9,36%) e “Formações não carsificáveis” (23,36%) fosse superior. Esta última incoerência poderá estar relacionada com as diferenças detetadas entre a cartografia geológica e o trabalho cartográfico de CRISPIM (1995), sendo estas diferenças assinaláveis neste tipo de unidades litostratigráficas.



**Figura 28** - Mapa litológico do sector setentrional do Planalto de Santo António segundo CRISPIM (1995).

Com os dados explanados no parágrafo anterior reforçamos a validade dos procedimentos analíticos utilizados e da qualidade do modelo final para a determinação do potencial endocársico na área de estudo. A possibilidade de aplicar este modelo, ou a metodologia que lhe esteve na origem, a outras áreas do Maciço Calcário Estremenho, assim como, a outras regiões cársicas do Centro de Portugal, requer cuidados. A informação disponível sobre as unidades litostratigráficas, estrutura geológica, topografia e cobertura de solo/vegetação é determinante para uma boa avaliação da sua propensão à carsificação, tal como, a existência de estudos com objetivos semelhantes para a área/região em análise que contribuam para a verificação do modelo. Por último, a existência de informação georreferenciada sobre o endocarso, ainda que incompleta, é decisiva na verificação da coincidência da localização das grutas com as áreas de potencial mais elevado, ou seja, na avaliação e validação do modelo.

Relativamente aos restantes fatores condicionantes da carsificação em profundidade, apresentamos no Quadro 16 dados com o número de cavidades por cada classe, assim como a sua densidade por Km<sup>2</sup>. Ao contrário do que seria de esperar, observamos que para a densidade de fraturação “Moderada” e “Elevada” existe um maior número de cavidades, ao invés da classe “Muito elevada”. Ainda assim registamos uma maior densidade de cavidades nas classes “Elevada” e “Muito elevada”.

Quando analisamos a relação espacial entre a energia do relevo e a localização das entradas das cavidades conhecidas, seria de esperar um maior número destas nas zonas onde existe maior energia potencial - no entanto são as classes “Baixa” e “Muito baixa” a registar maior importância nesta correlação. Tal situação pode ser explicada considerando que, muitas vezes, na área de estudo, estas áreas com “Baixa” a “Muito baixa” energia do relevo correspondem a importantes corredores de fratura, representando, assim, zonas preferenciais de infiltração das águas. Por outro lado, a densidade de cavidades é superior nas classes “Baixa” e “Muito elevada”, o que nos leva a concluir que a diferença de extensão entre classes não está em linha com o número de cavidades em cada uma.

Por último, na ocupação do solo também se registam valores algo diferentes do esperado, é na classe “Matos” onde se observa maior número e maior densidade de cavidades, ao invés das “Florestas”, “Pastagens” e “Agricultura”. Não obstante as aparentes incoerências entre as classes ponderadas para os fatores agora analisados e a localização (expectável) das cavidades, somos levados a relativizar um pouco estes dados, pois as ponderações consideradas no Quadro 14 e os valores obtidos nas curvas de sucesso conferem uma importância ligeiramente diferente dos fatores para o potencial endocársico.

**Quadro 15** - Comparação das formações classificadas e cartografadas por CRISPIM (1995) quanto à carsificação relativamente às classes do potencial endocársico.

Potencial endocársico	Área (m <sup>2</sup> )	% da área de estudo	Sobreposição das classificações na cartografia de CRISPIM (1995) com o potencial endocársico	Área coincidente com a classes de potencial endocársico (m <sup>2</sup> )	% de coincidência com a classe de potencial endocársico
Muito elevado	4894668,28	9,06	Formações carsificadas	4743435,62	96,91
			Formações medianamente carsificadas	12378,92	< 1
			Formações fracamente carsificadas	9420,63	< 1
			Formações não carsificadas	37784,11	< 1
			Formações não carsificáveis	91649,01	1,87
Elevado	19106230,78	35,38	Formações carsificadas	18714560,98	97,95
			Formações medianamente carsificadas	116502,42	< 1
			Formações fracamente carsificadas	45860,33	< 1
			Formações não carsificadas	34126,21	< 1
			Formações não carsificáveis	195180,84	1,02
Moderado	12786235,69	23,68	Formações carsificadas	10310336,73	80,63
			Formações medianamente carsificadas	506737,59	3,96
			Formações fracamente carsificadas	1766443,29	13,82
			Formações não carsificadas	166493,64	1,30
			Formações não carsificáveis	36224,44	< 1
Baixo	4604806,45	8,53	Formações carsificadas	271714,24	5,90
			Formações medianamente carsificadas	2599799,64	56,46
			Formações fracamente carsificadas	1425902,95	30,97
			Formações não carsificadas	196143,16	4,26
			Formações não carsificáveis	111246,46	2,42
Muito baixo	12608058,80	23,35	Formações carsificadas	442543,35	3,51
			Formações medianamente carsificadas	7764112,64	61,58
			Formações fracamente carsificadas	276281,08	2,19
			Formações não carsificadas	1180476,63	9,36
			Formações não carsificáveis	2944645,11	23,36



**Quadro 16** - Cavidades subterrâneas naturais inventariadas por classes dos fatores de carsificação.

<b>Fatores (critérios)</b>	<b>Classes</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>N.º de cavidades subterrâneas inventariadas</b>	<b>N.º de cavidades subterrâneas inventariadas/Km<sup>2</sup></b>
Densidade da fraturação (Km de fraturas por Km <sup>2</sup> )	<i>Muito baixa</i>	21,99	5	< 1
	<i>Baixa</i>	14,67	6	< 1
	<i>Moderada</i>	9,55	11	1,15
	<i>Elevada</i>	5,24	19	3,63
	<i>Muito elevada</i>	2,55	7	2,75
Energia do relevo (diferença altimétrica em metros numa quadrícula 100 x 100 m)	<i>Muito baixa</i>	19,75	18	< 1
	<i>Baixa</i>	16,45	20	1,22
	<i>Moderada</i>	10,35	7	< 1
	<i>Elevada</i>	5,44	1	< 1
	<i>Muito elevada</i>	2,01	2	1,00
Ocupação do solo	<i>Florestas</i>	7,22	2	< 1
	<i>Pastagens</i>	7,81	4	< 1
	<i>Agricultura</i>	14,71	1	< 1
	<i>Matos</i>	20,54	40	1,95
	<i>Espaços descobertos ou com pouca vegetação</i>	0,08	0	0
	<i>Territórios artificializados</i>	3,64	1	< 1

## 8. CONCLUSÕES

Existe uma relação de interdependência entre o exocarso e o endocarso, mesmo que estes se desenvolvam em condições distintas e a diferentes velocidades (no espaço e no tempo), no quadro mais geral da evolução geomorfológica cársica de um maciço rochoso carbonatado. É deste modo importante conhecer o potencial de carsificação subterrânea (= potencial endocársico), sendo este menos perceptível (por vezes mesmo invisível) que o potencial de carsificação superficial. Modelos cartográficos como o que apresentamos no presente trabalho são essenciais ao apoio à decisão em Instrumentos de Gestão do Território, nomeadamente na gestão dos riscos (*e.g.*, abatimentos em cavidades subterrâneas) e na gestão de recursos endógenos (*e.g.*, qualidade da água dos aquíferos, recursos turísticos, património geomorfológico). Também podem assumir um papel preponderante na prospeção de grutas (apoio à espeleologia).

O potencial endocársico está associado à tendência de maior ou menor desenvolvimento de formas subterrâneas (cavidades) que, por vezes, têm expressão à superfície (*e.g.*, entrada de algares e de lapas). Depende de vários fatores condicionantes que contribuem de forma diferenciada para o processo de carsificação em profundidade e que, em regra, quase sempre funcionam de modo interdependente. A litologia (com particular destaque para a litostratigrafia) tem grande importância na carsificação, logo seguida da densidade da fraturação, sendo que esta última também está dependente da primeira em termos faciológicos e estratonómicos (sobretudo quando se consideram rochas duras como as carbonatadas). Detalhes associados à estratonomia e à geometria das camadas carbonatadas podem ser determinantes para o maior ou menor potencial endocársico. A facilidade com que as águas meteóricas entram no maciço rochoso e o modo como o percorrem assume particular importância e, por isso, torna-se essencial caracterizar também as eventuais coberturas existentes (*e.g.*, depósitos siliciclásticos, solo e vegetação). A entrada das águas meteóricas no maciço rochoso está intrinsecamente ligado à existência de fissuras, sendo que, a velocidade dessas águas é potenciada pelo gradiente hidráulico, ou seja, pela diferença altimétrica entre pontos de entrada (*e.g.*, sumidouros) e pontos de saída (exurgências).

As características geológicas e geomorfológicas do sector setentrional do Planalto de Santo António revelaram-se determinantes para a avaliação do potencial endocársico, assim como o conhecimento da localização das entradas das cavidades naturais conhecidas (em grande parte devido ao meritório trabalho das equipas de espeleólogos que aqui trabalham e de outros exploradores) foi importante para a validação do modelo em avaliação. Com base nos resultados obtidos, e por ordem de importância, verificamos que na área de estudo são fatores potenciadores da carsificação subterrânea (à escala local) as seguintes características geológicas, geomorfológicas e edáficas: (i) rochas

carbonatadas relativamente mais puras e com textura mais fina que, geralmente, pertencem às sucessões estratigráficas com camadas mais espessas e pouco inclinadas, nomeadamente os Calcários micríticos de Serra de Aire ( $J^2_{SA}$ ) e os Calcários de Chão das Pias ( $J^2_{CP}$ ); (ii) a existência de sucessões carbonadas mais heterogéneas onde, juntamente com os estratos mais solúveis, interestratificam outros conjuntos líticos mais insolúveis, tais como as Margas e Calcários margosos de Zambujal ( $J^2_{ZA}$ ); (iii) áreas com maior densidade de fraturação, como as existentes a este e a oeste de São Bento, topo da Costa de Alvados e relevos próximos da Costa da Mendiga respetivamente; (iv) áreas com maior diferença altimétrica em relação aos locais de recarga (tanto difusa como concentrada) e de descarga (exurgências) do sistema – *i.e.*, as áreas com maior energia do relevo (*e.g.*, Costa de Alvados); (v) por último, áreas com uma cobertura detrítica, de solo e vegetação, associada à existência de floresta mas também à agricultura (*e.g.*, pastagens), que originam um atraso na infiltração e na percolação subsuperficial, ao mesmo tempo que tornam as águas meteóricas mais agressivas (*e.g.*, São Bento e Chão das Pias).

O PAH mostrou ser robusto, no âmbito da análise multivariada, para a avaliação do potencial endocársico, facilitando a atribuição de ponderações entre as várias classes de cada fator considerado e entre esses fatores (comparação par a par), ao mesmo tempo, quantificando cada uma das ponderações e permitindo a verificação de consistência das matrizes de comparação. Das ponderações atribuídas destacou-se a importância da litologia (juntamente com as características faciológicas e estratonómicas) e da fraturação para a carsificação subterrânea.

A verificação da capacidade preditiva do modelo cartográfico construído foi possível pela correlação dos resultados do potencial endocársico com a localização das entradas das cavidades naturais subterrâneas conhecidas e pela análise das curvas de sucesso traçadas para as áreas de treino, de teste e de estudo (= total). Todas as áreas apresentaram valores na Área Baixa da Curva superiores a 80%, o que demonstra muito boa capacidade preditiva do modelo. Os resultados obtidos parecem bastante promissores, na medida em que as entradas da maioria das cavidades conhecidas no sector setentrional do Planalto de Santo António localizam-se nas áreas classificadas com elevado a muito elevado potencial endocársico. Ainda assim, consideramos que a existência de dados relativos ao desenvolvimento das formas endocársicas (*e.g.*, levantamentos topográficos) seria uma mais-valia para este tipo de estudo. O cruzamento dos polígonos representativos da extensão das cavidades conhecidas com as manchas poligonais no mapa do potencial endocársico permitir-nos-ia aferir com maior exatidão a consistência do modelo cartográfico produzido.

O facto de o Planalto de Santo António ser uma área bastante estudada ao nível da Geologia, Geomorfologia e Espeleologia (AZERÊDO, 1993, 1998; CANAIS & FERNANDES, 1999; CARVALHO, 2013; CRISPIM, 1992, 1995; MARTINS, 1949; RODRIGUES, 1998; THOMAS, 1985) facilitou a construção e a aceitação do modelo. Destacamos a importância da caracterização das fácies carbonatadas do Jurássico Médio por AZERÊDO (1993), dos trabalhos de inventariação de cavidades subterrâneas naturais e das litologias cartografadas por CRISPIM (1995), assim como a análise estrutural do maciço de CARVALHO (2013, 2018).

Consideramos que o modelo cartográfico produzido pode ser refinado com dados geológicos e geomorfológicos mais completos, mas sobretudo com dados sobre o endocarso mais consistentes, aliás, a própria avaliação do modelo depende destes últimos. Devido a algumas limitações a comparação par a par foi realizada apenas pelo autor, porém temos em consideração que a aplicação do PAH deve ser estendida à avaliação de vários profissionais ligados ao estudo do carso, com diferentes experiências e sensibilidades.

Por último, julgamos que a utilização do modelo a áreas maiores no Maciço Calcário Estremenho, ou mesmo a outros maciços calcários, é imprescindível para a sua legitimação numa perspetiva de generalização da sua aplicação. Não obstante a avaliação do modelo na área em estudo, ficou claro que este é bastante dependente da qualidade/quantidade da informação que lhe serve de base, nomeadamente, do conhecimento do endocarso.

Consideramos que o objetivo principal deste trabalho - identificar, analisar e ponderar os fatores condicionantes da carsificação subterrânea que afeta as unidades carbonatadas no sector setentrional do Planalto de Santo António - foi conseguido. As limitações impostas pelo tipo de dados geológicos/geomorfológicos e das cavidades subterrâneas disponíveis, indicam-nos que o modelo cartográfico do potencial endocársico produzido tem espaço para evoluir, nomeadamente, através da incorporação de mais dados geológicos com representação cartográfica, da recolha de informação geomorfológica no campo e do refinamento das ponderações (*e.g.*, análise das ponderações por vários especialistas no carso, ou até experimentando a utilização de outros métodos mais complexos cuja carga de subjetividade seja reduzida ao mínimo).

## BIBLIOGRAFIA

- AFSAR, F., WESTPHAL, H., PHILIPP, S.L. (2014) - How facies and diagenesis affect fracturing of limestone beds and reservoir permeability in limestone - marl alternations. *Marine and Petroleum Geology*, 57, pp. 418-432.
- ANELLI, F. (1975) - Nuove osservazioni sui fenomeni carsici, paracarsici e pseudocarsici. *Atti Seminario Speleogenesi, Le Grotte d'Italia*, 1973, 4 (4), pp. 165-198.
- ARRIEGAS, P.I., LUIS, F.R. (2015) - Explorações Subaquáticas no Olho do Moinho da Fonte - "Gruta do Almonda". 6.º Congresso Nacional de Espeleologia, Alvados, pp. 93-106
- AUBRY, T., LUÍS, L., DIMUCCIO, A. (2012) - Nature vs. Culture: present-day spatial distribution and preservation of open-air rock art in the Côa and Douro River Valleys (Portugal). *Journal of Archaeological Science*, pp. 848-865.
- AULER, A. S. (2013) - Sources of water aggressiveness - the driving force of karsification. In: Shroder, J. (Editor Principal), Frumkin, A. (Editor), *Treatise on Geomorphology*, Academic Press, San Diego, CA, Vol. 6, Karst Geomorphology, pp. 23-28.
- ALVES, T.M., MANUPELLA, G, GAWTHORPE, R.L., HUNT, D.W., MONTEIRO, J.H. (2003) - The depositional evolution of diapir- and fault-bounded rift basins: examples from the Lusitanian Basin of West Iberia. *Sedimentar Geology*, 163, pp. 273-303.
- ALVES, T.M., MOITA, C., SANDNES, T.C., MONTEIRO, J.H., PINHEIRO, L.M. (2006) - Mesozoic–Cenozoic evolution of North Atlantic continental-slope basins: The Peniche basin, western Iberian margin. *AAPG Bulletin.*, Vol. 90 (1), pp. 31-60.
- AZERÊDO, A.C. (1993) - Jurássico Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica): análise de fácies, micropaleontologia, paleogeografia. Tese de Doutoramento, Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 366 p.
- AZERÊDO, A.C. (1998) - Geometry and facies dynamics of Middle Jurassic carbonate ramp sandbodies. West-Central Portugal, University of Birmingham, 34 p.
- AZERÊDO, A.C. (2007) - Formalização da litostratigrafia do Jurássico Inferior e Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica). *Comunicações Geológicas*, t. 94, pp. 29-51.

- AZERÊDO, A.C., DUARTE, L.V., HENRIQUES, M.H., MANUPPELLA, G. (2003) – Da dinâmica continental no Triásico aos Mares do Jurássico Inferior e Médio. *Cadernos de Geologia de Portugal*, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, pp. 5-43, 7 ests.
- BAIONI, D., TRAMONTANA, M. (2017) - Energy of relief as useful geomorphic index to record seabed tectonic activity: preliminary results from the Sardinia Basin (Tyrrhenian Sea). *Geophysical Research Abstracts*, EGU 2017, Vol. 19, 1762 p.
- BARTON, H.A. (2013) - Biospeleogenesis. In: Shroder, J. (Editor Principal), Frumkin, A. (Editor), *Treatise on Geomorphology*, Academic Press, San Diego, CA, Vol. 6, Karst Geomorphology, pp. 38-56.
- BERTRAND, G. (1982) - Construire la Geographie Physique. *Herodote*, 26, Paris, pp. 90-116.
- BI, J., BENNETT, K.P. (2003) - Regression Error Characteristic Curves. *Proceedings of the Twentieth International Conference on Machine Learning (ICML-2003)*, Washington DC, pp. 43-50.
- BÖGLI, A. (1960) - Kalkosung und karren bildung. *Zeitschr. Fur Geomorph. Supplementband*, 2, pp. 4-21.
- BOSELLINI, A, MUTTI, E., RICCI LUCCHI, F. (1989) - Rocce e successioini sedimentary. *UTET*, Torino, 412 p.
- BRILHA, J. (2005) - Património geológico e geoconservação a conservação da natureza na sua componente geológica. *Palimage*, Viseu, 190 p.
- BURCHETTE, T.P., WRIGHT, V.P. (1992) - Carbonate ramp depositional systems. *Sedimentary Geology*, 79, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, pp. 3-57.
- CALLAPEZ, P.M., DINIS, J.L., SOARES, A.F., MARQUES, J.F. (2010) - O cretácico superior da Orla Mesozoica Ocidental de Portugal (Cenomaniano a Campaniano Inferior). *Ensino e Investigação e sua história*, Vol. I, Capítulo III, Paleontologia e Estratigrafia, pp. 331-340.
- CANAIS, F., FERNANDES, J. (1999) - Lapas e Algares da Serra de Santo António. *SubTerra - Grupo de Espeleologia*, 187 p.
- CARVALHO, J., MATIAS, H., TORRES, L., MANUPELLA, G., PEREIRA, R., MENDES-VICTOR, L. (2005) - The structural and sedimentary evolution of the Arruda and Lower Tagus sub-basins, Portugal. *Marine and Petroleum Geology*, 22, pp. 427-453.



- CARVALHO, J.M. (2013) - Tectónica e caracterização da fraturação do Maciço Calcário Estremenho, Bacia Lusitânica. Contributo para a prospeção de rochas ornamentais e ordenamento da atividade extrativa. Tese de Doutoramento, Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 443 p.
- CARVALHO, J.M. (2018) - Jointing patterns and tectonic evolution of the Maciço Calcário Estremenho, Lusitanian Basin, Portugal. *Journal of Structural Geology*, 110, pp. 155-171.
- CHOFFAT, P. (1882) - Note sur les vallées tiphoniques et les éruptions d'ophite et de teschenites en Portugal. *Bull. Soc. Géol. France*, 3e sér., X, Paris, pp. 267-295.
- CHOFFAT, P. (1883/1884) - Nouvelles données sur le vallées typhoniques et sur les éruptions d'ophite et de teschénite en Portugal. *Comm. Trab. Geol. Portugal*, (I), pp. 113-122.
- CRISPIM, J.A. (1992) - Características cársicas das rochas carbonatadas da região central do Maciço Calcário Estremenho. *Algar, Boletim da Sociedade Portuguesa de Espeleologia*, 3, Lisboa, pp. 9-18.
- CRISPIM, J.A. (1995) - Dinâmica cársica e implicações ambientais nas depressões de Alvados e Minde. Tese de Doutoramento em Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 388 p.
- CUNHA, L. (1988) - As Serras Calcárias de Condeixa-Sicó-Alvaiázere. Estudo de Geomorfologia. Tese de Doutoramento, Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, 325 p.
- CUNHA, L. (1993) - Geomorfologia estrutural e cársica. O Quaternário em Portugal, Balanço e Perspectivas, Colibrí, Lisboa, pp. 63-74.
- CUNHA, P.P., LEGOINHA, P., DIAS, R.P., PEREIRA, D., RAMOS, A. (2013) - Cenozoico das bacias do Douro (sector ocidental), Mondego, Baixo tejo e Alvalade. In: Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P., Kullberg, J.C. (Editores), *Geologia de Portugal*, Escola Editora, Vol. II, pp. 461-532.
- CUNHA, L., DIMUCCIO, L.A., AUBRY, T. (2014) - Património cársico no Centro de Portugal. O caso do Maciço de Sicó. Património Geomorfológico e Geoconservação. Experiências em Portugal e no Brasil, Atas/proceedings do I Encontro Luso-Brasileiro de Património Geomorfológico e Geoconservação, pp. 27-34.
- CUNHA, L., DIMUCCIO, L.A., PAIVA, I. (2018) - Geopatrimónio cársico e desenvolvimento local no Maciço de Sicó. Desafios para afirmar a Lusofonia na Geografia Física e Ambiente, II Encontro Luso-Afro-Americano de Geografia Física e Ambiente, pp. 1227-1233.

- DAVEAU, S. (2004) - O Relevo de Portugal. Grandes Unidades Regionais. In: Feio, M. & Daveau, S. (Organizadores), Coimbra, Associação Portuguesa de Geomorfólogos, pp. 61-73.
- DE VICENTE, G., CLOETINGH, S., VAN WEES, J.D., CUNHA, P.P. (2011) - Tectonic classification of Cenozoic Iberian foreland basins. *Tectonophysics*, 502, pp. 38-61.
- DIMUCCIO, L.A. (2014) - A carsificação nas colinas dolomíticas a sul de Coimbra (Portugal Centro-Ocidental - Fácies deposicionais e controlos estratigráficos do (paleo)carso no Grupo de Coimbra (Jurássico Inferior). Tese de Doutoramento em Geologia, Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 436 p.
- DIMUCCIO, L.A. (2017) - Tempo e espaço num geossistema cársico: os "pilares" em que assenta e se sustenta a interpretação da sua evolução geológicogeomorfológica. In: Espaços e tempos em Geografia: Homenagem a António Gama, Imprensa da Universidade de Coimbra, pp. 207-238.
- DIMUCCIO, L.A., DUARTE, L.V., CUNHA, L. (2016) - Definição litostratigráfica da sucessão calcolomítica do Jurássico Inferior da região de Coimbra-Penela (Bacia Lusitânica, Portugal). *Comunicações Geológicas*, 103 (1), pp. 77-96.
- DIMUCCIO, L.A., CUNHA, L. (2020) - Controlos estratigráficos da (paleo)carsificação nas unidades calcolomíticas da base do Jurássico Inferior em Coimbra (Portugal Central). In: Abrantes, I., Callapez, P.M., Correia, G.P., Gomes, E., Lopes, B., Lopes, F.C., Pires, E., & Rola, A. (Editores), Uma visão holística da Terra e do Espaço nas suas vertentes naturais e humanas. Homenagem à Professora Celeste Romualdo Gomes, Coimbra: CITEUC, pp. 282-300.
- DINIS, J. (2001) - Definição da Formação da Figueira da Foz; Aptiano a Cenomaniano do sector central da margem oeste ibérica. *Comunicações do Instituto Geológico e Mineiro*, 88, pp. 127-160.
- DINIS, J.L., REY, J., CUNHA, P.P., CALLAPEZ, P., PENA DOS REIS, R. (2008) - Stratigraphy and allogenic controls of the western Portugal Cretaceous: an updated synthesis. *Cretaceous Research*, 29, pp. 772-780.
- DREYBRODT, W., LAUCKNER, J., ZAIHUA, L., SVENSSON, U., BUHMANN, D. (1996) - The kinetics of the reaction  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$  as one of the rate limiting steps for the dissolution of calcite in the system  $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2 - \text{CaCO}_3$ . *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60 (18), pp. 3375-3381.
- DUBLYANSKY, V.N., KIKNADZE, T.Z. (1983) - Hydrogeology of Karst of the Alpine Folded Region of the South of the U.S.S.R., Nauka. Moscow, 125 p. [em russo].

- EKMEKC, M. (2003) - Review of Turkish karst with special emphasis on tectonic and climatic controls. *Acta Carsologica*, 32 (2), pp. 205–218.
- ESTEBAN, M., KLAPPA, C.F. (1983) - Subaerial exposure. In: Scholle, P.A., Bebout, D.G. & Moore, C.H. (Editores), *Carbonate Depositional Environments*, American Association of Petroleum Geologists, Memoir, 33, pp.1-54.
- FERREIRA, A.B., RODRIGUES, M.L., ZÊZERE, J.L. (1988) - Problemas da Evolução Geomorfológica do Maciço Calcário Estremenho. *Finisterra*, XXIII (45), Lisboa, pp. 5-28.
- FIGUEIREDO, R.F. (2001) – Modelação cartográfica em ambiente SIG para apoio à decisão: aplicação ao estudo da afectação potencial de usos do solo no sector Norte do Maciço Marginal de Coimbra. Dissertação de mestrado em Geografia Física e Estudos Ambientais, Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, 204 p.
- FLEURY, E. (1925) - Portugal Subterrâneo, Ensaio de espeleologia portuguesa. Coleção Natura, Lisboa, 45 p.
- FLÜGEL, E. (2004) - Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 976 p.
- FORD, D., WILLIAMS, P. (2007) - Karst Geomorphology and Hydrology. John Wiley & Sons, Ltd, 562 p.
- GAMS, I. (1993) - Origin of the term "karst", and transformation of the classical karst (kras). *Environmental Geology*, 21 (3), pp. 110-114.
- GHUNG, C.F. FABRI, A.G. (2003) - Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. *Natural Hazards*, 30, pp. 451-472.
- GILLIESON, D. (1996) - Caves: Processes, Development, Management. Oxford Blackwell, 336 p.
- GOEPEL, K. (2018) - AHP Excel Template with multiple Inputs. Version AHPcalc-v2018-09-15.
- GOODCHILD, M. (2009) - NeoGeography and the nature of geographic expertise. *Journal of Location Based Services*, 3 (2), pp. 82-96.
- GOMES, A. (2008) - Evolução Geomorfológica da Plataforma Litoral entre Espinho e Águeda. Tese de Doutoramento em Geografia Física, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, 337 p.
- GUZZETTI, F., REICHENBACH, P., CARDINALI, M., GALLI, M., ARDIZZONE, F. (2005) - Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72, pp. 272–299.

- YALCIN, A. (2008) - GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping Using Analytical Hierarchy Process and Bivariate Statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of Results and Confirmations. *Catena*, 72, pp. 1-12.
- INÊS, N. (2010) - Paleotipologias diagenéticas em formações carbonatadas do Jurássico Médio da Bacia Lusitânica: análise multiescala e aplicações à caracterização de reservatórios. Dissertação de Mestrado na Área de especialização: Estratigrafia, Sedimentologia e Paleontologia, Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 230 p.
- JAMES, N.P., CHOQUETTE, P.W. (1984) - Diagenesis 9, Limestones - The Meteoric Diagenetic Environment. *Carbonate Sedimentology and Petrology*, Vol. 4, pp. 45-78.
- JENNINGS, J.N. (1985) - *Karst Geomorphology*. Oxford Blackwell, 293 p.
- KLIMCHOUK, A. (2007) - *Hyponogene Speleogenesis: hydrogeological and morphogenetic perspective*. Second edition, 107 p.
- KLIMCHOUK, A. (2015) - The karst paradigm: changes, trends and perspectives. *Acta Carsologica*, 44 (3), Postojna, pp. 289-313.
- KLIMCHOUK, A., FORD, D., PALMER, A., DREYBRODT, W. (2000) - *Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers*. National Speleological Society. Alabama, January 2000 Edition, 527 p.
- KULLBERG, J.C., ROCHA, R.B., SOARES, A.F., REY, J., TERRINHA, P., AXERÊDO, A.C., CALLAPEZ, P., DUARTE, L.V., KULLBERG, M.C., MARTINS, L., MIRANDA, R., ALVES, C., MATA, J., MADEIRA, J., MATEUS, O., MOREIRA, M., NOGUEIRA, C.R. (2013) - A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. In: Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P. & Kullberg, C. (Editores), Portugal, Vol. II, *Geologia Meso-cenozóica de Portugal*. Escolar Editora, pp. 195-347.
- KULLBERG, J.C., ROCHA, R.B., SOARES, A.F., DUARTE L.V., MARQUES, J.F. (2014a) - Palaeogeographical Evolution of the Lusitanian Basin (Portugal) During the Jurassic. Part I: The Tectonic Constraints and Sedimentary Response. In: Rocha, R., Pais, J., Kullberg, J.C. & Finney, S. (Editores), *Strati 2013, First International Congress on stratigraphy. At the cutting edge of Stratigraphy*, Springer Geology, XLV, pp. 665-672.

- KULLBERG, J.C., ROCHA, R.B., SOARES, A.F., DUARTE L.V., MARQUES, J.F. (2014b) - Palaeogeographical Evolution of the Lusitanian Basin (Portugal) During the Jurassic. Part II: The Slow-to-Fast Transformations of Sedimentary Infilling. In: Rocha, R., Pais, J., Kullberg, J.C. & Finney, S. (Editores), Strati 2013, First International Congress on stratigraphy. At the cutting edge of Stratigraphy, Springer Geology, XLV, pp. 673-679.
- KRANJC, A. (2001) - About the name kras (karst) in Slovenia. Proceedings of the 13th International Congress of Speleology, Brazilia, Sociedade Brasileira de Espeleologia, pp. 517-519.
- LAUBACH, S.E., OLSON, J.E., GROSS, M.R. (2009) - Mechanical and fracture stratigraphy. AAPG Bulletin, 93 (11), pp. 1413-1426.
- LONGLEY, P.A., GOODCHILD, M.F., MAGUIRE, D.J., RHIND, D.W. (2011) - Geographic Information Systems & Science. Third Edition, John Wiley & Sons, 539 p.
- MANUPELLA, G., TELLES ANTUNES, M., COSTA ALMEIDA, C.A., AZERÊDO, A.C., BARBOSA, B., CARDOSO, J.L., CRISPIM, J.A., DUARTE, L.V., HENRIQUES, M.H., MARTINS, L.T., RAMALHO, M., SANTOS, V.F., TERRINHA, P. (2000) - Notícia explicativa da folha 27-A Vila Nova de Ourém. Departamento de Geologia, Instituto Geológico e Mineiro, 158 p.
- MARTINS, A.F. (1949) - Maciço Calcário Estremenho. Contribuição para um Estudo de Geografia Física. Tese de Doutoramento, Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, 248 p.
- MARTONNE, E. (1953) - Tratado de Geografia Física. Panorama da Geografia, Livro I, Edições Cosmos, 969 p.
- MELLO, Y.R., SILVEIRA, C.T. (2018) - Análise de Modelos Digitais de Elevação e geração de atributos topográficos para a região da Serra do Mar do estado de Santa Catarina. Revista Brasileira de Geografia Física, 11 (6), pp. 2029-2045.
- MENDES, A.G., DIMUCCIO, L.A. (2013) - Geomorfologia: a construção de uma identidade. In: Riscos naturais, antrópico e mistos. Livro de Homenagem ao Prof. Doutor Fernando Rebelo, Departamento de Geografia, Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra, Simões & Linhares, Lda. (Editores), pp. 779-795.
- NICOD, J. (1972) - Pays et paysages du calcaire. Collection Sup - Le Géographe, Presses Universitaires de France, Vol. I, 244 p.

- MORADI, S., KALANTARI, N., CHARCHI, A. (2016) - Karstification Potencial Mapping in Northeast of Khuzestan Province, Iran, using Logic and Analytical Hierarchy Process (AHP) techniques. *Geopersia*, 6, pp. 265-282.
- MOORE, H. (2001) - Carbonate Reservoirs: Porosity, Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework. Vol. 55, 1st Edition, Elsevier, 460 p.
- MOORE, H., WADE, W.J. (2013) - Carbonate reservoirs: porosity, evolution, and diagenesis in a sequence stratigraphic framework. Vol. 67, Elsevier, 374 p.
- MOUTERDE, R., RAMALHO, M., ROCHA, R.B., RUGET, C., TINTANT, H. (1972) - Le Jurassique du Portugal. Esquisse stratigraphique et zonal. *Bol. Soc. Geol. Portugal*, Lisboa, XVII (1), pp. 73-104.
- NOLA, I.T.S., BACELLAR, L.A.P. (2021) - Multi-criteria analysis for mapping susceptibility to iron formation caves development in the Gandarela mountain range (MG), southeast Brazil. *International Journal of Speleology*, 50 (2), Tampa, FL (USA), pp. 137-187.
- NOIRIEL, C., GOUZE, P., MADE, B. (2013) - 3D analysis of geometry and flow changes in a limestone fracture during dissolution. *Journal of hydrology*, 486, pp. 211-223.
- OLIVEIRA, S.M.C. (2012) – Incidência Espacial e Temporal da Instabilidade Geomorfológica na Bacia do Rio Grande da Pipa (Arruda dos Vinhos). Tese de doutoramento em Geografia Física, Universidade de Lisboa, 496 p.
- PAIS, J., CUNHA, P.P., PEREIRA, D., LEGOINHA, P., DIAS, R., MOURA, D., BRUM DA SILVEIRA, A., KULLBERG, J.C., GONZÁLEZ-DELGADO, J.A. (2012) - The Paleogene and Neogene of Western Iberia (Portugal). A Cenozoic record in the European Atlantic Domain. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 151 p.
- PAIVA, I.M.R. (2014) - Hidrossistema Cársico de Dregracias-Sicó. Estudo do funcionamento hidrodinâmico a partir das suas respostas naturais. Tese de doutoramento em Geografia, Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, 445 p.
- PALAIN, C. (1976) - Une serie detritique terrigène. Les "grès de Silves", Trias et Lias infériuer du Portugal. *Mem. 25 (N.S.)*, Serviços Geológicos, Portugal, Lisboa.
- PALMER, A.N. (1989) - Stratigraphic and structural control of cave development and groundwater flow in the mammoth cave region. White, W.B. et al. (Editores), *Karst Hydrology*, Springer Science+Business Media New York, pp. 293-316.



- PALMER, A.N. (2007) - Cave Geology. Allen Press, Lawrence, Kansas.
- PALMER, A.N. (2013) - Sulfuric acid caves: morphology and evolution. In: Shroder, J. (Editor Principal), Frumkin, A. (Editor), Treatise on Geomorphology, Academic Press, San Diego, CA, Vol. 6, Karst Geomorphology, pp. 241-257.
- PEACOCK, D.C.P., MANN, A. (2005) - Evaluation of the controls on fracturing in reservoir rocks. Journal of Petroleum Geology, 28 (4), October 2005, pp. 385-396.
- PEZDIČ, J., ŠUŠTERŠIČ, F., MIŠIŠ, M. (1998) - On the role of clay-carbonate reactions in speleogenesis: a contribution to the understanding of the earliest stage of karst channel formation. Acta Carsologica, 27, pp. 187-200.
- PENA DOS REIS, R., PIMENTEL, N. L., GARCIA, A. (2010) – A Bacia Lusitânica (Portugal): análise estratigráfica e evolução dinâmica. B. Geoci. Petrobras, Rio de Janeiro, 19 (1/2) (nov. 2010/nov. 2011), pp. 23-52.
- PROTHERO, D. R., SCHWAB, F. (1996) – Sedimentary Geology, An Introduction to Sedimentary Rocks and Stratigraphy. W. H. Freeman and Company, New York, 575 p.
- RAMOS, A., CUNHA, L., CUNHA, P. (2014) - Application de la Méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique à l'étude des glissements de terrain dans la région littorale du centre du Portugal: Figueira da Foz – Nazaré. Geo-Eco-Trop, Liège, 38 (1), pp. 33-44.
- RAUCH, H.W., WHITE, W.B. (1970) - Lithologic controls on the development of solution porosity in carbonate aquifers. Water Resources Research, 6 (4), pp. 1175-92.
- REBELO, F., CUNHA, L. (1991) - Relevo de Portugal. Enciclopédia Temática - Portugal Moderno - Geografia, Lisboa, POMO, Edições Portugal Moderno, pp. 13-27.
- REBELO, F. (1992) - Relevo de Portugal - uma introdução. Inforgeo, 4, pp. 17-35.
- RIBEIRO, A. (2013) - Evolução geodinâmica de Portugal; os ciclos ante-mesozóicos. In: Dias, R., Araújo A., Terrinha, P., Kullberg, J.C., (Editores), Geologia de Portugal, Escola Editora, Vol. II, pp. 15-57.
- RIBEIRO, A., ANTUNES, M.T., FERREIRA, M.P., ROCHA, R.B., SOARES, A.F., ZBYSZEWSKI, G., MOITINHO DE ALMEIDA, F., CARVALHO, D., MONTEIRO, J.H. (1979) - Introduction à la géologie générale du Portugal. Serviços Geológicos de Portugal, 114 p.

- RIBEIRO, A., KULLBERG, M., KULLBERG, J., MANUPPELLA, G., PHIPPS, S. (1990) - A review of Alpine tectonics in Portugal: Foreland detachment in basement and cover rocks. *Tectonophysics*, 184 (3-4), pp. 357–366.
- ROCHA, R.B., SOARES, A.F. (1984) - Algumas reflexões sobre a sedimentação jurássica na orla mesozóica ocidental de Portugal. *Mem. Notícias Universidade Coimbra*, 97, pp. 133-142.
- RODRIGUES, L.M.E. (1998) - Evolução geomorfológica quaternária e dinâmica actual. Aplicações ao ordenamento do território. Exemplos no Maciço Calcário Estremenho. Tese de Doutoramento em Geografia Física, Universidade de Lisboa, 868 p.
- RODRIGUES, M.L. (2020) - The Limestone Massif of Estremadura. In: G. Vieira, G., Zêzere, J.L., Moura, C., (Editores), *Landscapes and Landforms of Portugal*, *World Geomorphological Landscapes*, pp. 229-250.
- RODRIGUES, M.L., CUNHA, L., RAMOS, C., RAMOS PEREIRA, A., TELES, V., DIMUCCIO, L.A. (2007) - *Glossário Ilustrado de Termos Cársicos*. Coordenação Maria Luísa Rodrigues, Edições Colibri, Lisboa, 152 p.
- RODRIGUES, H.A., RODRIGUES, M.L., LOBO, H.S. (2017) - Espeleoturismo em Portugal: Panorama Geral do Uso Turístico das Cavidades Naturais. *Revista Rosa dos Ventos - Turismo e Hospitalidade*, 9 (I), pp. 92-106.
- SAATY, T. (1988) - *The Analytic hierarchy process. Planning, priority setting, resource allocation*. University of Pittsburg, Pittsburg, 287 p.
- SAATY, T. (1990) - How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, Vol. 48, pp. 9-26.
- SAATY, T. (2008) - Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*. 1 (1), 2008, pp. 83-98.
- SAATY, T. (2009) - *Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks*. RWS Publications, Pittsburg, PA, USA, 352 p.
- SAATY, T., VARGAS, L.G. (2001) - *Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Kluwer Academic, Boston, 333 p.
- SALOMON, J.N. (2000) - *Précis de Krastologie*. Presses Universitaires de Bourdeaux, Pessac, Bourdeaux, 249 p.

- SAURO, U. (1979) - Morfologia carsica. Geomorfologia di G. B. Castiglioni, UTET, Itália, pp. 208-253.
- SEIF, A., EBRAHIMI, B. (2014) - Using GIS to evaluate degree of karstification according to some important factors in carbonate rocks in Iran. Carbonate Evaporites, 29, pp. 107-126.
- SILVA, S.G. (2014) - Sistema de apoio à decisão espacial multicritério na localização de centrais de biogás. Tese de Doutoramento, Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra, 232 p.
- SOARES, A.F., ROCHA, R.B., ELMI, S., HENRIQUES, M.H., MOUTERDE, R., ALMERAS, Y., RUGET, C., MARQUES, J., DUARTE, L., CARAPITO, C., KULLBERG, C. (1993) - Le sous-bassin nord-lusitanien (Portugal) du Trias au Jurassique moyen: histoire d'un "rift avorté". C.R. Acad. Sci. Paris, 317, Serie II, Paris, pp. 1959-1666.
- SOARES, A.F. (1998/2001) - Reflexões sobre os tempos de carsificação dos Maciços Calcários de Sicó, Alvaiázere e Estremenho. Livro de Homenagem ao Prof. Doutor Gaspar Soares de Carvalho, Braga, pp. 363-375.
- SOARES, A.F., KULLBERG, J.C., MARQUES, J.F., ROCHA, R.B., CALLAPEZ, P.M. (2012) - Tectono-sedimentary model for the evolution of the Silves Group (Triassic, Lusitanian basin, Portugal). Bull. Soc. Géol. France, t. 183 (3), pp. 203-2016.
- TORRES, E., SPOLADORE, A. e CUNHA, L. (2018) – Espeleoturismo: nota preliminar sobre as realidades paranaense e portuguesa. Paisagem e Território, Londrina, UEL, pp. 83-88.
- THOMAS, C. (1985) - Cova da Velha. Espeleo Divulgação, 4, Núcleo de Espeleologia da Universidade de Aveiro, pp. 30-35.
- TRUDGILL, S.T. (1985) - Field observations of limestone weathering and erosion in the Malham District, North Yorkshire. Field Studies, 6, pp. 201-236.
- VARGAS, H.S., ALMEIDA, J.A., KULLBERG, J.C., BRITO, M.G. (2003) - Prospecção interactiva de endocarso através de uma aplicação SIG. Finisterra, XXXVIII, 76, pp. 51-64.
- VERESS, M. (2020) - Karst types and their karstification. Journal of Earth Science, Vol. 31 (3), pp. 621-634.
- WALTHAM, A.C. (1981) - Origin and development of limestone caves. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, Volume 5, pp. 242-256.
- WHITE, W.B. (1988) - Geomorphology and hidrology of karst terrains. O.U.P. New York, 464 p.

WILLIAMS, P.W. (2008) - The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. *International Journal of Speleology*, 37(1), pp. 1-10.

WILSON, J.L. (1974) - Characteristics of Carbonate-Platform Margins. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 58 (5), pp. 810-824.

WILSON, J.L. (1975) - Carbonate facies in geologic history. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 471 p.

WILSON, R.C.L. (1988) - Mesozoic development of the Lusitanian basin, Portugal. *Rev. Soc. Geol.España*, 1 (3-4), pp. 393-407.

ZHONG, C. (2011) - Carbonate rock dissolution rates in different landuses and their carbon sin effect, *Chinese Science Bulletin*. 56 (35), pp. 3759-3765.

### **DADOS CARTOGRÁFICOS**

Centro de Informação Geoespacial do Exército (2014 a 2016) - Cartografia Militar à escala 1:25 000 da série M888, Folhas: 296, 297, 298, 307, 308, 309, 317, 318, 319, 327, 328, 329, 339 e 340.

Direção-Geral do território (2018) - Carta de ocupação do Solo.

Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF) e Parque Natural das Serras de Aire e Candeeiros (PNSAC) (2020) - Inventário das cavidades subterrâneas naturais no Maciço Calcário Estremenho (dados vetoriais).

Instituto Geológico e Mineiro (1998) - Carta Geológica de Portugal, Folha 27-A (Vila Nova de Ourém), à escala 1:50 000, 2.ª Edição.

Instituto Geológico e Mineiro (1998a) - Carta Geológica de Portugal em formato vetorial, à escala 1:25 000, correspondente à Folha 318, por sua vez pertencente à Folha 27-A (Vila Nova de Ourém), à escala 1:50 000, 2.ª Edição (cedida pelo Município de Porto de Mós).

Município de Porto de Mós (2020) - Cartografia vetorial homologada à escala 1:10 000.