

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA TERRA

**Modelação 3D de um Subsector das Mineralizações Auríferas
de Casas Novas, Montemor-o-Novo**

Filipa Vieira Matias

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica (Georrecursos)

Orientador: Doutor José António de Almeida

Co-Orientador: Doutor Martim Afonso Ferreira de Sousa Chichorro

Monte da Caparica

Janeiro 2010

Agradecimentos

Science is a “we”, not an “I”...

Dr. Robert Ballard

São inúmeras as pessoas que, por cruzarem o meu caminho, contribuíram para a construção do trabalho que aqui apresento e para a profissional que me pretendo tornar.

Palavras houvesse e nenhum nome ficaria por escrever...

Existem, no entanto, nomes e entidades que não posso deixar de referir e expressar os meus sinceros agradecimentos.

- À empresa *Iberian Resources*, pela gentil cedência dos dados e confiança que depositaram em mim e no meu trabalho. Sem a base de dados desta empresa, a realização do presente trabalho não seria possível;
- Ao Dr. Luís Martins (DGGE), ao Dr. Daniel Oliveira (LNEG) e ao LNEG pela constante disponibilidade, ajuda e “ponte” com a empresa *Iberian Resources*.

A todos o meu sincero obrigado. Espero não ter defraudado a confiança e as expectativas criadas.

Ao Doutor José António Almeida, pela paciente orientação e infindável “poço” de resposta às minhas constantes dúvidas e incertezas. Nele vejo um profissional que admiro profundamente e me inspira a ser rigorosa, metódica e a ver sempre mais além do problema que tento resolver. Por me ensinar, acreditar em mim e me dar oportunidade de trabalhar em algo que me dá imenso prazer, os meus sinceros agradecimentos.

Ao Doutor Martim Chichorro, pela inesgotável capacidade de me levar a pensar e a querer descobrir sempre mais além. Pelo exemplo de profissional, pela sempre presente palavra amiga e pelo imenso conhecimento que me incentiva a aprender sempre mais. Sem ele o trabalho teria sido muito mais difícil, e hoje sou melhor aluna (porque estamos sempre a aprender) em grande parte pelo seu modo de ensinar e positiva atitude perante os desafios. Ao Martim, o meu sincero obrigado.

Aos meus colegas de sala, pela companhia e longas conversas de alento e boa disposição: ao António Ferreira pela constante disponibilidade e ajuda; à Agnieszka Ysocka e ao Nuno Barreiras, pelas conversas “leves” e saudáveis gargalhadas, que ajudam a aliviar os momentos

de maior tensão e à Isabel Borges e ao Nuno Leal, pela companhia e boa disposição. A todos, os meus agradecimentos.

À Luísa Bragança e ao João Oliveira. Por terem atravessado comigo esta etapa da minha vida académica. Por serem os confidentes de dúvidas e alegrias, e acima de tudo os amigos que levo comigo.

Ao Marco Rocha e ao Filipe Soares. Por directa ou indirectamente terem partilhado estes meus momentos e serem, sem sombra de dúvida, uma voz que oiço, respeito e admiro. A todos os outros cujo já longo texto não me permite nomear, o meu obrigada por estarem presentes, e fazerem dos meus “tempos de faculdade” lembranças felizes e que quero guardar.

À Professora Graça Brito e ao Professor Paulo Caetano. Por encurtarem a distância Professor-Aluno, e com isto permitirem uma melhor aprendizagem, um gosto prazeroso em aprender, e a certeza de que o futuro é sempre promissor. A eles, o meu muito obrigada.

Ao Paulo Quental. Por ser quem é. Porque a nossa cumplicidade permite-me caminhar sempre mais além, aliviar as ocasiões menos boas e fazer, mesmo os momentos mais simples, perfeitos e felizes. Obrigada pelo que temos e pelo que me dás.

A última palavra vai para aqueles que são constantes, e cujo silêncio e sorriso vale mais que mil palavras. À minha família. Por me levarem sempre, e ao colo, onde nunca pensei chegar. Por me encorajarem a ser sempre melhor, e por me darem o melhor exemplo parental, profissional e humano que um dia poderei encontrar. Sem eles, nunca seria aquilo em que me tornei, e nunca teria atingido o objectivo que aqui apresento. Por isso, e pelo amor que lhes tenho, à minha família, dedico todo o meu percurso académico, materializado no presente trabalho. Ao meu pai, à minha mãe e irmã o meu eterno obrigada.

Resumo

Este trabalho teve como objectivo a construção de um modelo geológico 3D de um subsector das mineralizações auríferas de Casas Novas, Montemor-o-Novo.

Os dados utilizados foram fornecidos pela *Iberian Resources* com base em trabalhos de campo e prospecção realizados até à data. Os dados, obtidos em sondagens e sanjas, consistem em descrições geológicas e respectivos teores em ouro e arsénio. O modelo geológico global foi desenvolvido em duas grandes etapas interligadas.

Na primeira etapa obteve-se uma representação disjuntiva, de tipo vectorial – superfícies fechadas – do que se designou por litogrupos, isto é, associações de litologias com características afins e que se comprovou discriminarem os teores em ouro. Este modelo de representação por superfícies fechadas foi obtido por interpolação sucessiva de pares de contornos digitalizados ao longo de perfis, segundo interpretação pericial prévia. Ao todo foram definidos 3 litogrupos principais a partir das 40 descrições litológicas iniciais.

Na segunda etapa fez-se a modelação dos teores de ouro, previamente subdivididos em 3 classes (altos, médios e baixos), com o algoritmo geoestatístico de simulação sequencial da indicatriz (SSI). As imagens simuladas foram condicionadas aos teores obtidos das sondagens e sanjas (dados *hard*) e indirectamente ao modelo dos litogrupos obtido na primeira etapa (dados *soft*) por imposição de proporções locais diferenciadas.

A metodologia utilizada permitiu que se integrasse no modelo final grande parte do conhecimento geológico desta complexa área mineralizada e, simultaneamente, relançou a discussão sobre a geologia do local, face a alguns dos resultados inequívocos obtidos pelos métodos geoestatísticos, nomeadamente a estrutura de continuidade espacial dos teores de ouro.

Palavras-Chave: mineralizações auríferas em zonas de cisalhamento, modelo geológico 3D, litogrupos; simulação sequencial da indicatriz.

Abstract

The aim of this study is to construct a 3D geological model of a subsector of Casas Novas gold mineralization in Montemor-o-Novo area.

The data used for this study were provided by Iberian Resources Company based on field work carried out so far in boreholes and trenches and consists of geological descriptions and gold and arsenic grades. The overall geological model was developed in two main interconnected stages.

In the first stage it was obtained a disjunctive vector type - closed surfaces - representation of lithogroups, i.e. associations of lithologies with similar characteristics and exhibiting gold grades discrimination. This model represented by closed surfaces was obtained by successive interpolation of pairs of contours digitized along the profiles, as interpreted by an expertise. Three main lithogroups were identified among the 40 initial lithological descriptions.

A model of gold grades previously subdivided in 3 classes (high, medium and low) was the result of the second stage, by using the geostatistical algorithm sequential indicator simulation (SIS). The gold simulated images are conditioned both to the grades obtained in the boreholes and ditches (hard data) and indirectly to the model of lithogroups obtained in the first stage (soft data) by imposing different local proportions.

The proposed methodology enables to include in the final model much of the geological knowledge of this complex mineralization, inserted in a shear zone, and, simultaneously, relaunched the geological discussion of the area, for instance explaining the unequivocal results obtained by the structure of spatial continuity of gold levels.

Key-words: Auriferous mineralizations in shear-zones,; 3D geological model, lithogroups; sequential indicator simulation.

ÍNDICE GERAL

1. Introdução	17
1.1. Apresentação do estudo, sua importância e objectivos	17
1.2. Organização da tese	18
1.3. O gOcad	19
1.4. Localização da área em estudo	20
2. Considerações Sobre Zonas de Cisalhamento e Mineralizações Auríferas Associadas	23
2.1. Zonas de cisalhamento.....	23
2.1.1. Zonas de cisalhamento em regime de transição frágil-dúctil	25
2.2. Zonas de cisalhamento e geometria das mineralizações associadas.....	27
2.2.1. Mineralizações auríferas em zonas de cisalhamento com regime de transição frágil-dúctil	29
2.2.2. O modelo trifásico de metalogénese de jazigos auríferos em zonas de cisalhamento	29
3. Enquadramento Geológico	33
3.1. Introdução	33
3.2. Enquadramento regional.....	33
3.2.1. A Zona de Ossa-Morena.....	34
3.2.2. O Maciço de Évora.....	35
3.3. Enquadramento local	37
3.3.1. Zona de cisalhamento de Montemor-o-Novo.....	37
3.3.1.1. Série Negra di Escoural (Ediacárico.....	38
3.3.1.2. Complexo Ígneo (essencialmente félsico) - Sedimentar de Monfurado (Câmbrico Inferior-Médio).....	39
3.3.1.3. Complexo Ígneo (essencialmente máfico) - Sedimentar do Carvalhal (Câmbrico a Ordovício?).....	39
3.3.1.4. Formação de Predeira de engenharia e Formação de Cabrela.....	40
3.3.2. Sector de Casas Novas – Nossa Senhora da Boa Fé (Zona de Falha da Boa Fé)	40
3.3.2.1. Caracterização lito-estratigráfica e estrutural do sector de Casas Novas	40
3.3.2.2. Diques ígneos melanocráticos e leucocráticos (Carboníferos).....	42
4. Metodologia e Fundamentos Teóricos	47
4.1. Metodologia.....	47

4.2. Fundamentos teóricos geoestatísticos.....	50
4.2.1. Formalismo da indicatriz.....	50
4.2.1.1. Populações multifásicas com p classes.....	51
4.2.2. Variografia.....	52
4.2.2.1. Variografia de populações multifásicas com p classes.....	54
4.2.2.2. A problemática do efeito de escala.....	55
4.2.3. Simulação sequencial da indicatriz.....	56
4.2.3.1. Simulação para populações multifásicas com p classes.....	57
4.2.3.2. Correção posterior das probabilidades locais.....	58
4.3. Fundamentos teóricos do software gOcad.....	60
4.3.1. Modelação discreta (discrete modeling).....	60
4.3.1.1. Discrete smooth interpolation (DSI).....	60
4.3.1.2. Decomposição celular.....	61
5. Tratamento dos Dados Originais.....	63
5.1. Introdução.....	63
5.2. Dados geoquímicos.....	63
5.3. Dados geológicos.....	67
5.3.1. Análise heurística.....	68
5.3.1.1. Constituição dos litogrupos.....	68
5.3.1.2. Problemática na constituição dos litogrupos.....	70
5.3.2. Análise estatística.....	71
6. Modelação 3D dos Corpos Geológicos.....	75
6.1. Selecção de perfis.....	75
6.2. Desenho dos corpos geológicos nos perfis.....	76
6.3. Interpolação e fecho de superfícies.....	78
6.4. Conversão para estrutura matricial.....	81
6.5. Reavaliação da correlação dos litogrupos com os teores de ouro.....	83
7. Simulação dos teores de ouro.....	85
7.1. Análise espacial.....	85
7.1.1. Cálculo de variogramas multifásicos e ajustamento de modelos teóricos... ..	86
7.1.2. Justificação geológica para a existência de um modelo isotrópico.....	95
7.2. Simulação sequencial da indicatriz.....	98
7.2.1. Validação das imagens simuladas.....	99
7.2.2. Validação geológica das imagens simuladas.....	102
7.2.3. Análise da entropia das imagens simuladas.....	107

8. Discussão e considerações finais.....	111
9. Bibliografia.....	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localização da área em estudo (Carta Militar de Portugal, folha 459 – Valverde, Évora).....	20
Figura 2.1 – Ilustração das diferenças de deformação ocorridas, mediante o tipo de zona de cisalhamento: (a) frágil, (b)frágil-dúctil (semi-frágil) e (c) dúctil (Bursnall <i>et al</i> , 1989, segundo Ramsay, 1980 ^a)	24
Figura 2.2 – Relação entre a resistência do material e a profundidade na crosta oceânica e continental. Pretende-se ilustrar a diferença da profundidade a que se verifica a transição frágil-dúctil (Fonte: Bursnall <i>et al</i> , 1989).	26
Figura 2.3 – Modelo sinóptico de uma Zona de Cisalhamento (Fonte: Chichorro 2006, adaptado de Sholz, 1990 e Sibson, 1977).	27
Figura 2.4 – Geometria comum das mineralizações (Bursnall <i>et al</i> , 1989, segundo Hodgson, 1989).	28
Figura 3.1 – O Maciço Ibérico e sua subdivisão em zonas, em função das suas características estratigráficas, tectónicas e petrológicas. (Adaptado de Quesada (1991, 1992) , retirado de Chichorro, 2006)	33
Figura 3.2 – Mapa geológico simplificado do Maciço de Évora, onde se podem observar as principais unidades tectónicas desta estrutura: Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo, Terrenos de Alto Grau Metamórfico de Évora e Terrenos de Grau Metamórfico Intermédio de Évora (em Chichorro, 2006 e Pereira et al, 2007).	36
Figura 3.3 - Coluna litoestratigráfica da Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo proposta por Chichorro, 2006 e adaptada de Pereira <i>et al</i> , 2007.	38
Figura 3.4 – Mapa (A) e corte geológico (B) esquemático do sector de Casas Novas – Nossa Senhora da Boa Fé (Adaptado de Chichorro, 2006).....	44
Figura 3.5 – Exemplo de amostras de carotes de sondagens, colhidas no sector de Casas Novas - Nossa Senhora da Boa Fé. A – Contacto entre os leucogranitos e andesitos. B- Típico paragnaisse quatzo-biotítico com vénulas de quatzo; C – Gnaisse quatzo-feldespático e biotítico com varias gerações de veios ou segregações quatzosas. Algumas destas gerações apresentam-se mineralizadas com As e Au. A arsenopirite pode aparecer disseminada e dispersa no gnaisse. E e F - De notar que os veios ou	

segregações de quartzo apresentam uma predisposição sub paralela à da foliação milonítica. Estas fotografias (E e F), apresentam particular importância, uma vez que permitem distinguir duas gerações de veios ou segregações quartzicas. Uma dispõem-se sub-paralelas à foliação. Já as outras apresentam-se deformadas desenhando dobras intrafoliares. Notar a tendência para variações na espessura dos veios individuais que surge estiramento devido à deformação progressiva. F – Observar o aparecimento de cisalhamentos discretos de carácter frágil que segmentam os veios mineralizados..... 45

Figura 3.6 – Amostras de carotes de sondagens colhidas no sector de Casas Novas ilustrativas dos diques leucocráticos (A) e mesocráticos e melanocráticos (B). Na foto A observar a preservação de bandas isoladas do material existente encaixante, preservadas no granitóide..... 46

Figura 4.1 – Sequência de etapas envolvidas no presente estudo 48

Figura 5.1 – Planta com a localização das sondagens e sanjas na área em estudo..... 64

Figura 5.2 – Representação 3D das sondagens e sanjas na área em estudo (vista de SE).
..... 64

Figura 5.3 – Histograma cumulativo de teores de ouro..... 65

Figura 5.4 – Exemplo do procedimento para a uniformização dos suportes dos dados geoquímicos..... 66

Figura 5.5 – Proporção de cada classe em função da dimensão do suporte..... 67

Figura 6.1 – Localização dos perfis seleccionados em planta e em profundidade..... 76

Figura 6.2 – Perfil 1 e sondagens na área de influência..... 76

Figura 6.3 – Resultado da interpretação dos corpos geológicos (litogrupos 3 e 4) no perfil 1. 78

Figura 6.4 – Representação vectorial dos corpos geológicos correspondentes ao litogrupo 4 (rochas ígneas plutónicas hipabissais e subvulcânicas) As dimensões aproximadas de comprimento e altura, do conjunto dos corpos, são respectivamente 205 e 145m.. 79

Figura 6.5 – Representação vectorial dos corpos geológicos correspondentes ao litogrupo 3 (rochas máficas). As dimensões aproximadas de comprimento e altura, do conjunto dos corpos, são respectivamente 205 e 145m..... 80

Figura 6.6 – Representação conjunta dos corpos geológicos correspondentes aos litogrupos 3 e 4 enquadrado com o relevo à superfície. A superfície a castanho simula a topografia. As dimensões da imagem, em termos de comprimento e altura são as mesmas do conjunto dos corpos geológicos do grupo 3.	80
Figura 6.7 – Representação das 7.285.000 células com 1m de dimensão em que se discretizou a área em estudo.	82
Figura 6.8 – Modelo dos litogrupos 3 e 4 transformado para o modo de representação matricial.	83
Figura 7.1 – Variograma experimental na direcção N30°E, 45°NE e ajustamento com modelo exponencial e esférico.	87
Figura 7.2 – Variograma experimental na direcção N30°W, 75°SW (atitude média da foliação milonítica que afecta a área de Casas Novas).	87
Figura 7.3 – Variograma experimental na direcção N65°W, 75°SW (Atitude dos corpos filonianos leucograníticos).	87
Figura 7.4 – Amostras de mão de um gnaiss quartzo-feldspático e biotítico.	89
Figura 7.5 – Esquematização dos resultados obtidos na análise espacial do perfil 1.	90
Figura 7.6 – Linha de teste das sondagens (45°N30°E) e respectivas linhas perpendiculares.	92
Figura 7.7 – Linha de teste 60°S30°W e respectivas linhas perpendiculares.	92
Figura 7.8 – Linha de teste horizontal e respectivas linhas perpendiculares.	92
Figura 7.9 – Linha de teste 10° S30°SE e respectivas linhas perpendiculares.	92
Figura 7.10 – Linha de teste 75° N65°W e respectivas linhas perpendiculares.	92
Figura 7.11 – Variograma experimental na direcção 45°, N20°E (direcção com maior número de par de pontos, obtida na análise espacial sistemática).	93
Figura 7.12 – Variograma omnidireccional (plano horizontal) (Variograma médio de todos os variogramas possíveis)	94
Figura 7.13 – Perfil 1 no plano YoZ, com a representação das classes auríferas correspondentes.	96

Figura 7.14 – Imagens simuladas no Perfil 1: A) modelo teórico esférico; B) modelo teórico exponencial.....	99
Figura 7.15 – Cubos simulados realizações #1, #15, #42 e #98.....	103
Figura 7.16 – Imagens simuladas no perfil 1. Realizações 1,15,42 e 98.....	103
Figura 7.17 – Imagens simuladas no perfil 2. Realizações 1,15,42 e 98.....	104
Figura 7.18 – Imagens simuladas no perfil 3. Realizações 1,15,42 e 98.....	104
Figura 7.19 – Imagens simuladas no perfil 4. Realizações 1,15,42 e 98.....	104
Figura 7.20 – Imagens simuladas no perfil 5. Realizações 1,15,42 e 98.....	104
Figura 7.21 – Imagens simuladas no perfil 6. Realizações 1,15,42 e 98.....	105
Figura 7.22 – Imagens simuladas no perfil 7. Realizações 1,15,42 e 98.....	105
Figura 7.23 – Entropia das imagens simuladas nos perfis 1 a 7.....	108
Figura 7.24 – Cruzamento do mapa da entropia com os corpos modelados, as sanjas e sondagens.	108
Figura 8.1 – Esquematização da delimitação de vários sectores consequência existência de uma rede anastomosada de acidentes NW-SE e WNW-ESSE frágeis e semi-frágeis.	115

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 – Empresas de prospecção detentoras de concessão da área correspondente às mineralizações de Santiago do Escoural, e respectivo período. Fonte: DGGE.	21
Tabela 5.1 – Classes de ouro, intervalos e representatividade.	66
Tabela 5.2 – Síntese das associações geológicas estabelecidas.....	70
Tabela 5.3 – Caracterização da ocorrência e representatividade dos litogrupos definidos na fase heurística.	72
Tabela 5.4 – Síntese das associações geológicas estabelecidas para os litogrupos a modelar	73
Tabela 5.5 – Representatividade dos litogrupos finais a modelar.	73
Tabela 6.1 – Proporção das classes dos teores de ouro por litogrupo na área da modelação e na área total.....	84
Tabela 7.1 - Comparação das proporções de cada classe aurífera das imagens simuladas e dos dados experimentais.	100

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO DO ESTUDO, SUA IMPORTÂNCIA E OBJECTIVOS

O presente trabalho tem como objectivo a construção de um modelo geológico 3D de um subsector das mineralizações auríferas de Casas Novas, Montemor-o-Novo, Évora. A modelação foi feita em duas etapas: i) a construção de um modelo morfológico de litogrupos e, ii) a construção do modelo de teores de ouro, condicionado ao modelo morfológico.

Um modelo geológico 3D (MG3D) é uma representação tridimensional dos corpos geológicos, observados e/ou inferidos, numa área de estudo, podendo incluir ou não propriedades petrofísicas e/ou geoquímicas (teores). O avanço tecnológico permitiu o desenvolvimento de aplicações informáticas que possibilitam a modelação 3D de objectos e respectiva visualização. Estas ferramentas vêm substituir, ou pelo menos complementar, os modelos clássicos a 2D como sejam os mapas e cortes geológicos. Os MG3D apresentam-se, hoje em dia, como uma ferramenta fundamental na indústria mineira e petrolífera, mas têm menor expressão na cartografia geológica clássica, sobretudo quando esta não apresenta objectivos estritamente económicos.

No âmbito desta dissertação apresenta-se uma metodologia que utiliza a interpretação geológica, materializada num modelo vectorial 3D, como informação secundária no modelo geoestatístico de teores em estrutura matricial. A análise geoestatística dos teores de ouro revelou-se extremamente útil para apurar uma forma e orientação dos corpos mineralizados no espaço 3D permitindo complementar e validar a interpretação pericial inerente à construção do modelo morfológico.

Um dos principais desafios do presente trabalho foi extrair da informação disponível, limitada no que se refere à orientação geral da estrutura mineralizada, alguma indicação da continuidade espacial da mesma. No caso em análise, a localização da informação geológica disponível (rede ou malha espacial de dados com base em cartografia de superfície e sondagens) não é regular, nem completamente aleatória, pelo que a análise ficou condicionada logo à partida. Por outro lado, as unidades geológicas têm distribuição particularmente complexa, em virtude de terem sido afectadas por intensa deformação varisca, metamorfismo de médio a alto grau e cíclicos processos de alteração hidrotermal. Consequentemente, a geologia desta região, inserida na Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo constitui, por si só, um desafio na construção do modelo morfológico tridimensional.

Em Portugal é inédita a modelação 3D da morfologia e teores de um sistema geológico desta natureza. Uma pesquisa bibliográfica sobre modelos geológicos 3D resulta num elevado número

de artigos científicos, no entanto, apenas se encontraram investigações em contextos distintos do estudado, como seja a modelação tridimensional de aquíferos (Ross *et al*, 2005 e Bonomi, 2009), de estruturas geológicas, com fins científicos ou mapeamento tridimensional (Martelet, *et al*, 2004; Tonini, *et al*, 2007; Gallerini & Donatis, 2007; Donatis, *et al*, 2007; Zanchi, *et al*, 2007; Tonini, *et al*, 2008), e ainda, a modelação de depósitos minerais (Veslud, *et al*, 2007; Feltrin *et al*, 2007, Ferreira *et al*, 2009), mas nenhum contendo características geológicas tão complexas quanto as presentes no caso de estudo desta dissertação.

O término do trabalho consiste na validação do modelo com base no conhecimento geológico e bibliográfico da região. A validação de um modelo como o que foi elaborado com duas componentes, uma pericial e outra estocástica, significa a compatibilização entre as duas abordagens na área da cartografia geológica. Com a utilização das ferramentas geoestatísticas, os resultados obtidos são meramente baseados numa conduta matemática e estatística, podendo considerarem-se “imparciais”. Já a construção de um modelo de desenho geológico que se baseie apenas na interpretação pericial dos dados disponíveis terá inevitavelmente, um carácter mais subjectivo, marcado pela interpretação do geólogo que os constrói. Acredita-se que a metodologia usada no presente trabalho (interpretação geológica e geoestatística), permitirá a obtenção de um modelo tridimensional mais credível, mas que simultaneamente mostra a incerteza associada. Esta é uma das principais vantagens em aliar a interpretação geológica aos dos modelos geoestatísticos.

A modelação tridimensional recorrendo a informação secundária condicionante já foi considerada por outros autores, de que se destacam McArthur, 1988, e Srivatava, 2005, mas constitui uma área de investigação actual. Acredita-se que o presente estudo e metodologia constituam uma base de trabalho para investigações futuras na região e na análise das condicionantes metalogenéticas deste tipo de depósitos mineralizados.

Em termos de aplicações informáticas, o presente trabalho foi realizado com o gOcad e o geoMS.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA TESE

A tese encontra-se dividida em oito capítulos. No primeiro capítulo é apresentado o estudo, objectivos e a localização da área em estudo. Achou-se pertinente a inclusão de uma pequena síntese de conceitos básicos inerentes a zonas de cisalhamento e respectiva influência em zonas mineralizadas, no que constitui o capítulo dois.

Seguidamente, dada a sua influência na constituição do modelo, no capítulo três apresenta-se detalhadamente o enquadramento geológico da região estudada.

A metodologia desenvolvida e realizada no presente trabalho está especificada no capítulo quatro, assim como todos os seus fundamentos teóricos.

No capítulo cinco são descritos os procedimentos efectuados para o tratamento dos dados iniciais. São apresentadas e justificadas as assumpções e associações criadas quer para os dados geológicos, quer para os dados geoquímicos.

Todo o procedimento efectuado na modelação tridimensional da geologia é descrito no capítulo seis. São também inseridas as interpretações geológicas alusivas aos resultados obtidos nesta etapa.

Todo o modelo geoestatístico é apresentado no capítulo sete, onde estão ilustradas as etapas e ferramentas utilizadas para a obtenção das imagens finais. Constam ainda interpretações e comentários sobre os resultados obtidos e é apresentado o modelo final.

No último capítulo são apresentadas as conclusões e referem-se as possíveis morfologias de jazigo e interpretações geológicas que se coadunem com o modelo tridimensional obtido no capítulo anterior. Apresentam-se ainda os comentários finais à metodologia aplicada e são propostos trabalhos futuros com o objectivo de complementar o estudo que aqui se apresenta.

1.3. O GOCAD

gOcad (*Geological object computer aided design*) é o nome de um projecto iniciado em 1989 pelo Professor Jean-Laurent Mallet na Ecole Nationale Supérieure de Géologie (ENSG), em Nancy. Actualmente o conceito *gOcad* está associado a duas entidades:

- i. *gOcad Reseach Group* – Equipa de investigadores que trabalham em diversas áreas, como sejam a geologia, a geoestatística, ciência computacional, engenharia petrolífera e geofísica. Tem como objectivo a definição de novas abordagens para a construção e actualização de modelos 3D de profundidade (sub-superfície), tendo em consideração a informação e conhecimento disponível;
- ii. *gOcad Consortium* – Consórcio internacional que reúne empresas, universidades e centros/institutos de investigação, cujo objectivo é promover o avanço na investigação e resultados na modelação tridimensional;

O *software gOcad*, principal produto deste projecto, tornou possível a integração de toda a investigação levada a cabo até então. Permite a gestão e modelação de informação geológica e geográfica, independente da estrutura da informação (pontos, linhas, superfícies, matrizes ou sólidos). Uma das principais aplicações deste *software* é a avaliação da geometria e

propriedades de jazigos, considerados bastante complexos, precisamente dado o desafio e dificuldades que a sua modelação tridimensional constitui.

1.4. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO

A área em estudo centra-se nas mineralizações de Casas Novas, concelhos de Montemor-o-Novo e Évora, no distrito de Évora, na região do Alentejo. Encontra-se representada na Carta Militar de Portugal, folha 459 – Valverde (Évora), e dista da aldeia com o mesmo nome e da povoação da N. Sra da Boa Fé, aproximadamente um quilómetro, que se encontra a nordeste da zona em estudo (Figura 1.1). O enquadramento da área é feito pelas aldeias de Casas Novas, Sesmarias e Chaminé a NW, N e NE respectivamente e pelas aldeias de Foros do Carvalhal, Nogueira e Ligeiro a W, S e SE. A área compreendida é de aproximadamente 660.000m^2 para um volume de $145.200.000\text{m}^3$.

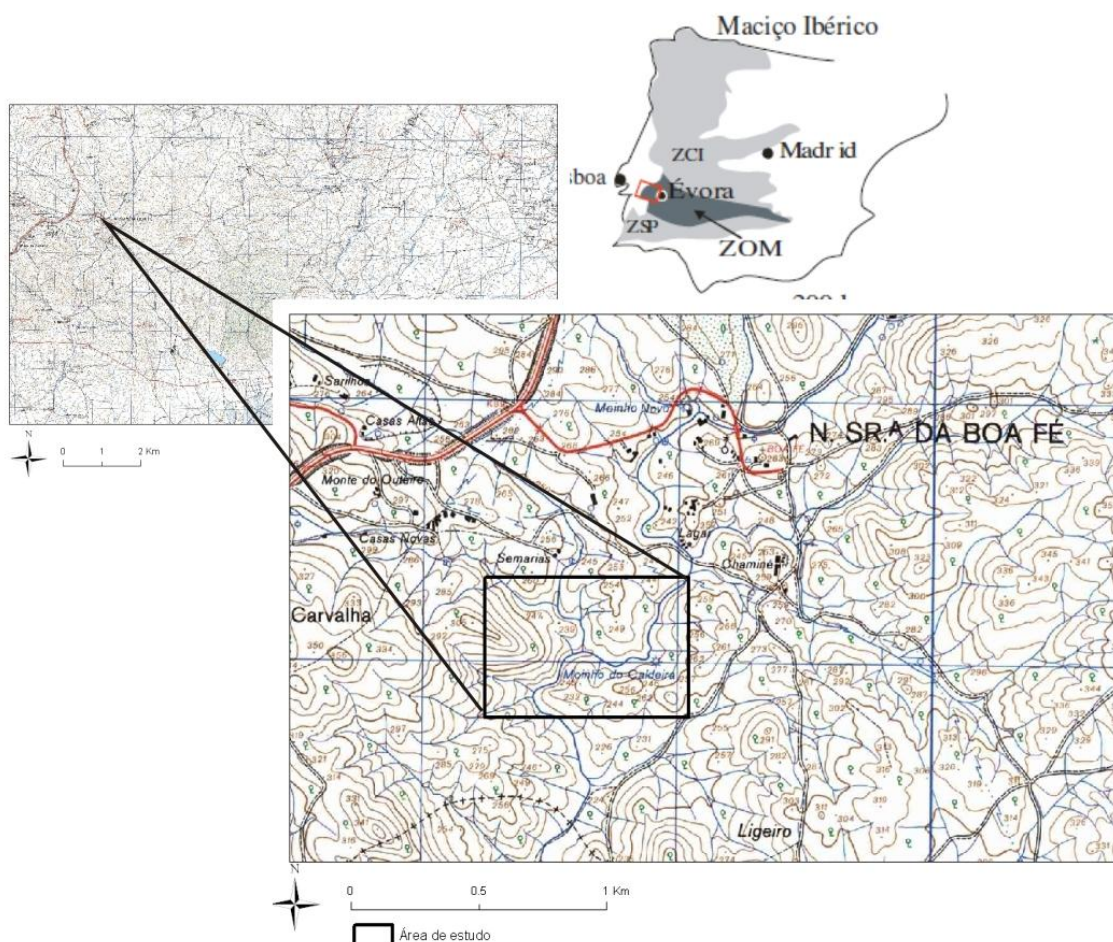


Figura 1.1 – Localização da área em estudo (Carta Militar de Portugal, folha 459 – Valverde, Évora).

As várias ocorrências de mineralizações auríferas de Santiago do Escoural (inferidas e provadas) estão dispersas pela Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo. Estas mineralizações foram alvo de intensos estudos e campanhas de prospecção levadas a cabo por várias empresas ao longo de mais de duas décadas, como se atesta na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Empresas de prospecção detentoras de concessão da área correspondente às mineralizações de Santiago do Escoural, e respectivo período. Fonte: DGGE.

Empresa de prospecção	Período de concessão
Iberian Resources	Fev.05 – Fev.09
	Set.04 – Set.08
Portuglobal/Moriminas	Maio 95 – Maio 99
SMRioArtezia	Out.84 – Set.88

Os resultados das diversas campanhas mostram que as jazidas com maior potencial mineiro se localizam ao longo da Zona de Falha da Boa Fé (ZFBF). Os jazigos da ZFBF mais significativos em termos de recursos inferidos e demonstrados são: Banhos, Casas Novas, Boa Fé, Caras, Covas e Braços.

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE ZONAS DE CISALHAMENTO E MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS ASSOCIADAS

A frequente sobreposição de processos dúcteis, dúcteis-frágeis e frágeis numa zona de cisalhamento conferem alguma complexidade ao estudo das mineralizações e dos processos metalogenéticos associados. Pretende-se nesta secção definir alguns conceitos relativos à tectónica de zonas de cisalhamento que permitam entender essa complexidade.

2.1. ZONAS DE CISALHAMENTO

Zona de cisalhamento (ZC), “shear zone” é a designação atribuída a uma área, em regra estreita e planar, na qual a deformação se concentra, relativamente às regiões periféricas (Ramsay, 1980; Ramsay & Hubert, 1983). O conceito de “shear zone” é independente da escala, uma vez que se pode aplicar desde a escala de fronteira de placas até à escala microscópica. As zonas de cisalhamento caracterizam-se por apresentarem vários domínios de deformação, desde zonas de elevados gradientes de deformação (“high strain”), a zonas onde se observam gradientes de deformação baixos ou nulos (“low strain”) (Goodwin & Tikof, (2002)^{a,b}). Frequentemente, os domínios de “high strain” distribuem-se no espaço de uma forma anastomosada envolvendo sectores de “low strain”. A magnitude da deformação pode ser variável no espaço (“partitioned”) a todas as escalas, sendo muitas vezes condicionada pelo contraste mecânico do material (competência física). O predomínio de escoamento plástico, em relação ao escoamento frágil, depende das condições termodinâmicas mas as taxas de deformação não dependem apenas da tensão, pois também variam consoante o contraste mecânico do material. Com isto, entenda-se que serão de esperar grandes variações nas taxas de deformação, quando o meio fornece grandes contrastes mecânicos, e essas variações podem ser bruscas.

As zonas de cisalhamento assumem diferentes designações consoante o regime de deformação em vigor: i) zona de cisalhamento frágil, quando se verifica um pré domínio da cataclase (cataclasitos), associados a episódios pontuais de elevadas taxas de deformação (Alsop & Holdsworth, 2004). Ocorre ruptura e separação ao longo de descontinuidades discretas (Figura 2.1 a)) ii) zona de cisalhamento dúctil, quando o estágio de deformação é continuamente alterado dentro dos limites da zona cisalhante. São dominadas por milonítos dúcteis, nos quais a deformação é acomodada através do escoamento do material de uma forma relativamente estável e continua (Figura 2.1 c)) (Alsop & Holdsworth, 2004); e iii) zona de cisalhamento

semi-frágil (ou frágil-dúctil), nas quais se verificam complexas interacções de elementos frágeis e dúcteis (Figura 2.1 b)).

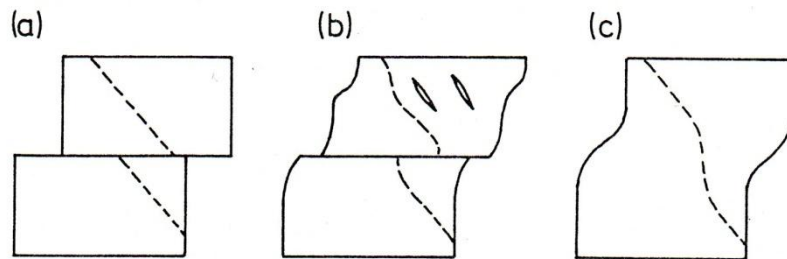


Figura 2.1 – Ilustração das diferenças de deformação ocorridas, mediante o tipo de zona de cisalhamento: (a) frágil, (b) frágil-dúctil (semi-frágil) e (c) dúctil (Bursnall *et al*, 1989, segundo Ramsay, 1980^a)

A deformação concentrada nas zonas de cisalhamento pode ser causada por uma componente *coaxial*, quando a deformação progressiva não implica a rotação dos principais eixos de deformação, relativos a uma linha de referência no corpo rochoso, ou *não-coaxial*, caso a deformação progressiva conduza à rotação das linhas de máxima e mínima alongação em relação a uma linha de referência no corpo rochoso (Ramsay & Huber, 1987).

Numa zona de cisalhamento, o estado de deformação de uma rocha varia no espaço, caracterizando-se a deformação de contínua, quando o regime que a caracteriza é dúctil. Quando a materialização da deformação é expressa em falhas e fracturas, a deformação diz-se descontínua, sendo o regime em vigor de características frágeis. Frequentemente as discontinuidades tendem a isolar domínios de intensidade de deformação contrastante (Chichorro, 2006).

No caso da área em estudo, a sua reconstituição geológica passa obrigatoriamente pelo episódio da orogenia varisca. A zona a estudar apresenta características estruturais que reflectem a componente não coaxial de um episódio da orogenia Varisca em que o regime tectónico dominante que terá afectado os terrenos relativos à Zona de Ossa Morena, estaria associado à convergência oblíqua. Hoje, a geometria da Zona de Ossa Morena é o reflexo da partição da deformação ao longo de sistemas de falhas “strike-slip” ou transcorrentes¹, com cinemática esquerda deduzida a partir de *fabrics* monoclinicas, que contornam e isolam secções que

¹ Nas falhas transcorrentes o movimento primário é sub-horizontal ao longo de um plano vertical (Kearey & Vine, 1990).

revelam gradientes de deformação menores, por vezes associados a *fabrics* ortorrômbicos (Pereira e Brandão, 2004). A Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo e a Zona de Falha da Boa Fé constituem ramos dessas faixas onde a deformação não coaxial imperou, uma vez que as rochas miloníticas e ultramiloníticas estão associadas a *fabrics* tendencialmente monoclinos (Chichorro, 2006).

É importante referir que, embora possa existir um regime de deformação dominante que espelhe uma componente não coaxial, regimes associados a condições locais podem se reflectir em coaxialidade do elipsóide de deformação, através de achatamento ou extensão pura. É também possível a observação de estruturas com cinemáticas opostas às dominantes. Tal ocorre devido à rotação das anisotropias para ângulos que favoreçam o cisalhamento puro e geração de cisalhamentos conjugados. Estas variações, observadas na distribuição espacial, podem ser observadas como sequências temporais, o que indica a continuidade de um processo, embora possa ser cíclico.

2.1.1. ZONAS DE CISALHAMENTO EM REGIME DE TRANSIÇÃO FRÁGIL-DÚCTIL

Uma vez que o estilo estrutural da Zona de Falha da Boa Fé, onde se inserem as mineralizações estudadas, apresenta similitudes com o estabelecido para zonas de cisalhamento na transição frágil-dúctil. Descrever-se-á, em seguida, o estilo e o regime de deformação associado a este andar estrutural.

Na crosta terrestre, a transição entre os regimes frágil e dúctil materializa-se numa zona complexa, onde ocorrem simultaneamente aspectos de deformação dúctil e frágil. As estruturas formadas estão obviamente dependentes de uma série de factores, que se revelam determinantes na dinâmica desta transição. A transição frágil-dúctil depende essencialmente das propriedades reológicas do material rochoso, e das condições termo-dinâmicas do meio, como sejam a temperatura, a pressão confinante, a taxa de deformação e a pressão dos fluidos. Para além das condições termo-dinâmicas, a reologia do meio também é muito dependente de factores como o tamanho do grão e a composição mineralógica. À temperatura da transição dúctil-frágil, o quartzo tende a fluir plasticamente por recristalização dinâmica enquanto que o feldspato tende a sofrer ruptura. Por sua vez, quanto menor for a granularidade do material, maior é a tendência para comportamento dúctil, uma vez que grãos de pequenas dimensões favorecem o fluxo dúctil (Bursnall *et al*, 1989). Na zona dúctil-frágil, as condições termodinâmicas, as taxas de deformação e a pressão de fluidos competem entre si quanto à sua influência no modo de escoamento do material. Assim, (i) um aumento da temperatura ou da pressão confinante

promove a ductilidade, enquanto que, (ii) o aumento da taxa de deformação, ou da pressão de fluidos ou ainda da tensão diferencial favorece um comportamento mais frágil.

Sob condições típicas, a profundidade de ocorrência de mudança de regime frágil para dúctil ocorre entre os 8 e os 12km, sendo a temperatura da ordem dos 240° a 360° (Bursnall *et al*, 1989). No entanto, estes valores devem ser ajustados consoante o tipo de crosta ser continental ou oceânica (Figura 1.2). Assumindo crosta padrão quartzo-feldspática, a resistência ao cisalhamento é máxima em regime de transição frágil-dúctil, sendo o comportamento do material caracterizado pela transição friccional/plástico-viscoso (Figura 2.2).

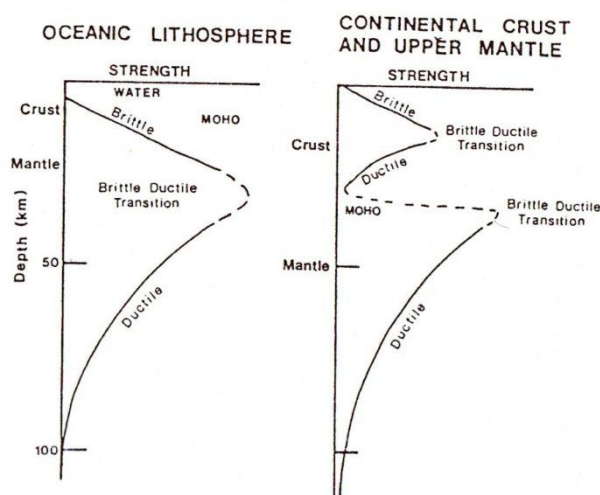


Figura 2.2 – Relação entre a resistência do material e a profundidade na crosta oceânica e continental. Pretende-se ilustrar a diferença da profundidade a que se verifica a transição frágil-dúctil (Fonte: Bursnall *et al*, 1989).

A profundidade a que ocorre esta transição é extremamente sensível às variações do gradiente geotérmico, que se assume de 30°/km. Esta variação de comportamentos apresenta influência na profundidade da zona de transição. Convém salientar que a transição frágil-dúctil não é pontual, podendo oscilar e abranger um longo intervalo de P e T. Os processos dúcteis competem com os processos frágeis, e a presença ou ausência de fluidos apresenta, neste aspecto, um papel fundamental. A presença, no mesmo contexto, de distintos tipos de tectonitos (milonitos, protomilonitos e protocataclasitos) testemunha a heterogeneidade da crosta e flutuabilidade entre fluência por escoamento plástico e a ruptura por falhamento frágil. Num estágio de transição desta natureza, verifica-se que a resistência dinâmica ao cisalhamento é tanto menor, quanto maior começa a ser a ductibilidade do material. Tal é comprovado pelo feldspato. À

medida que se desencadeiam os primeiros mecanismos de plasticidade nesse mineral, a resistência dinâmica ao cisalhamento diminui (Figura 2.3).

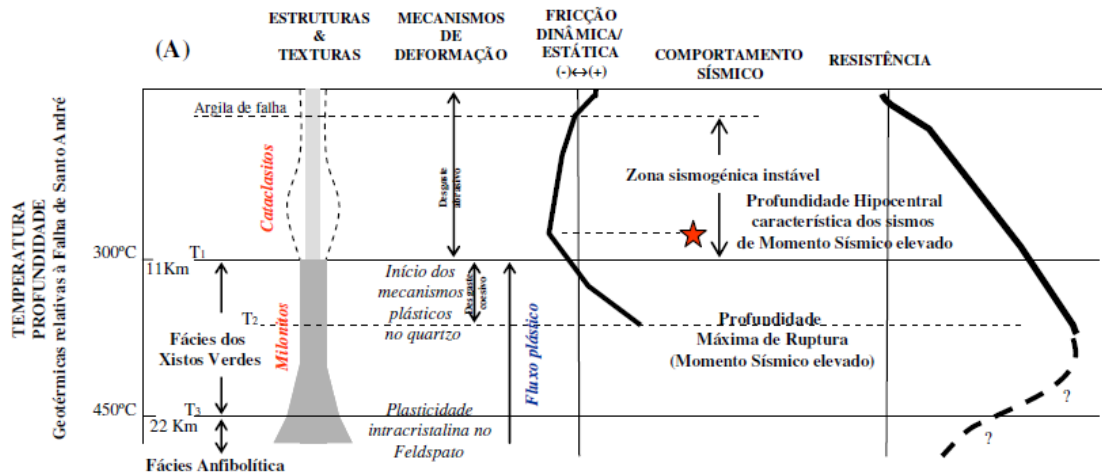


Figura 2.3 – Modelo sinóptico de uma Zona de Cisalhamento (Fonte: Chichorro 2006, adaptado de Sholz, 1990 e Sibson, 1977).

2.2. ZONAS DE CISALHAMENTO E GEOMETRIA DAS MINERALIZAÇÕES ASSOCIADAS

Na Zona de Ossa Morena, estão descritas várias evidências de sincronicidade entre as reacções de metamorfismo prógrado, fusão parcial e a deformação milonítica (Apraiz e Eguiluz, 2002; Chichorro, 2006, Moita 2008) realçando o facto de as zonas de cisalhamento constituírem por excelência zonas privilegiadas de transferência de calor (ascensão local das isotérmicas), fundidos e fluidos eventualmente mineralizados.

Os gradientes térmicos guiam a circulação dos fluidos os quais circulam através das anisotropias pré-existentes ou em novos espaços criados com a deformação progressiva. Por esta razão, as mineralizações associadas a zonas de cisalhamento apresentam um controle estrutural importante.

O controlo estrutural das mineralizações associadas a zonas de cisalhamento passa pela definição da morfologia das zonas mineralizadas a todas as escalas e pela caracterização da sua geometria espacial em relação aos restantes elementos estruturais.

A morfologia de zonas mineralizadas (mineralizações epigenéticas) não é, obviamente, independente do seu processo metalogenético. A sua origem pode estar associada a mecanismos de (i) preenchimento de espaços vazios, ou (ii) substituição.

As mineralizações do tipo substituição podem ser divididas de acordo com um aumento da introdução de minerais na formação rochosa original. Assim, e numa série gradual, as mineralizações por substituição classificam-se quanto à forma de: i) disseminadas, ii) “mediamente” disseminadas e de iii) substituição penetrativa (Bursnall, 1989). Já as mineralizações por preenchimento de espaços vazios são classificadas, quanto à forma e com base na escala dimensional, de veios e vénulas.

A Figura 2.4 resume as morfologias possíveis dos corpos mineralizados (zonas e veios mineralizados) associadas a zonas de cisalhamento, a sua relação com os restantes elementos estruturais (foliações e fracturas) e com as fronteiras das zonas de deformação não coaxial. A grande maioria das zonas mineralizadas associadas a zonas de cisalhamento, dispõem-se sub-paralelamente aos seus limites, sublinhando as superfícies C ou mimetizando superfícies C'. Frequentemente ocorrem veios dispostos em *en echelon*. Muitas mineralizações encontram-se localizadas nas intersecções de zonas de cisalhamento, e as mineralizações auríferas não são excepção.

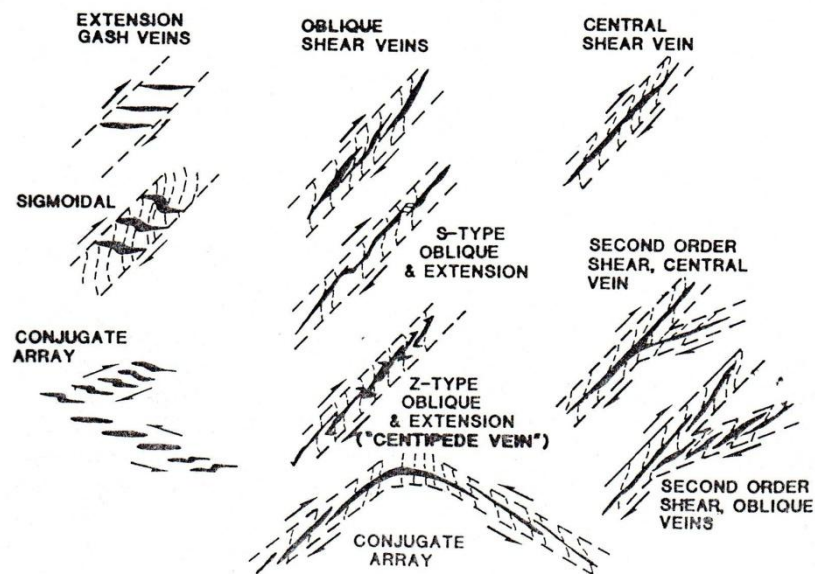


Figura 2.4 – Geometria comum das mineralizações (Bursnall *et al*, 1989, segundo Hodgson, 1989).

2.2.1. MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO COM REGIME DE TRANSIÇÃO FRÁGIL-DÚCTIL

É de consenso geral que o principal condicionador das características de depósitos de metais preciosos é de carácter estrutural, particularmente em zonas de cisalhamento caracterizadas por um regime na transição frágil-dúctil (Bursnall, 1989).

De acordo com (Bursnall, 1989), a deposição preferencial do ouro ocorre em zonas em dilatância estrutural (zonas microfracturadas, veios e vénulas), particularmente frequentes em “*jogs*” ou “*bends*” dilatacionais, associados a zonas complexas de interação de falhas e fracturas em propagação. Igualmente, é frequente a localização de veios auríferos em falhas derivadas (2º ou 3º ordem), dominado por um regime mais frágil contrastante com o regime dúctil das estruturas cisalhantes de 1º ordem. Em ambos os casos, o escape de fluidos hidrotermais reflecte as grandes variações de pressão de fluidos em regimes frágil-dúctil.

De qualquer forma, é necessário um gradiente de temperatura para estimular a circulação de fluidos, ao longo das condutas estruturais, e por esta razão são frequentes veios auríferos nas proximidades de fontes de calor (ex.corpos intrusivos).

2.2.2. O MODELO TRIFÁSICO DE METALOGÉNESE DE JAZIGOS AURÍFEROS EM ZONAS DE CISALHAMENTO

Bonnemaison & Marcoux, 1990 propõem um modelo metalogenético trifásico para explicar os jazigos auríferos em zonas de cisalhamento, o qual, em algumas das etapas, apresenta importantes analogias com o observado na ZFBF, nomeadamente: i) as estruturas tectónicas e milonitização observada, ii) a associação entre o ouro e a arsenopirite, iii) evidências de cloritização e iv) a presença de veios de quartzo mineralizados. .

Estes autores defendem um modelo de formação de jazigos auríferos subdividido em três etapas, sendo que as duas primeiras são igualmente subdivididas em dois episódios: i) Etapa inicial – i.1) Episódio 1 Inicial e i.2) Episódio 2 de concentração; ii) Etapa Intermédia – ii.1) Episódio 3 inicial e ii.2) Episódio 4 de concentração e iii) Etapa tardia – Episódio 5.

Este modelo assume que a zona de cisalhamento não funciona apenas como um controlador estrutural, mas constitui também, parte integrante do desenvolvimento e concentração dos veios auríferos. Acrescenta-se que os teores de ouro são distintos em cada fase do processo, sendo crescente a sua concentração ao longo do mesmo. Descrevem-se em seguida mecanismos dominantes em cada etapa do processo mineralizante em zonas de cisalhamento (ZC) sugerido por Bonnemaison & Marcoux, 1990.

Etapa Inicial

Episódio 1 – Fixação do ouro

As estruturas tectónicas, formadas durante a génese da ZC, adquirem características permeáveis, que lhes permite actuar como drenante dos fluidos hidrotermais. A acção combinada da deformação e circulação hidrotermal causa importantes alterações na composição mineralógica e geoquímica das rochas. O resultado é a dissolução parcial e redistribuição dos componentes químicos (incluindo Au), bem como a introdução de elementos externos e respectiva concentração no “núcleo” da ZC. A alteração hidrotermal é intensa (cloritização), e é acompanhada pela cristalização de pirrotite aurífera, sem que, no entanto, apresente qualquer valor económico.

Episódio 2 – Evolução da concentração aurífera

A alteração hidrotermal é cada vez mais intensa e promove o aumento da concentração de elementos drenados da ZC. Verifica-se a conversão de pirrotite e a consequente libertação do ouro já concentrado. A introdução do arsénio ocorre também nesta fase, formando-se a arsenopirite². O ouro libertado durante o processo é fixado na estrutura interna dos cristais de arsenopirite (sobretudo na periferia), sem se apresentar, contudo, mineralogicamente expresso.

Etapa 2 (Fase intermédia)

Episódio 3 – Formação de estruturas de “acolhimento” (host)- veios de quartzo

Aparecimento de “aberturas” (*openings*) na forma de fracturas ou veios. As aberturas formadas estão expressas na forma de veios de quartzo, mas podem igualmente ser preenchidos por líquidos magmáticos (ex. diques máficos (dioritos) ou félsicos (leucogranitos)). Estas rochas ígneas passam a constituir estruturas de acolhimento, que na generalidade não apresentam mineralizações auríferas, salvo raras excepções.

Episódio 4 – Concentração do ouro

A deformação cisalhante progressiva gera novas fracturas dilatantes, que vão continuamente ocorrendo e deforma as estruturas de “acolhimento” prévias. Frequentemente este novo regime

² A arsenopirite é um mineral característico das zonas de cisalhamento.

de deformação de deformação em regime semi-frágil e frágil fica expresso em intensa cataclase³ das estruturas, proporcionando-se assim localizações favoráveis à deposição do ouro. A mineralização em ouro das estruturas de “acolhimento” ocorre em zonas que já apresentam, ou apresentaram, durante os estados iniciais de formação, concentrações de ouro. Por acção dos fluidos hidrotermais, o ouro é lixiviado de uns locais, e reconcentrado noutros, nomeadamente nos veios cataclasados. Todo este processo provoca a destabilização dos sulfuretos auríferos e o aparecimento, pela primeira vez, de ouro no estado nativo. Estudos de inclusões fluidas revelam que depósitos desta natureza apresentam temperaturas da ordem dos 250 a 350°, sob pressões que variam entre os 0,5 e os 2 kb. A migração de fluidos ao longo da ZC parece estar acompanhada por alterações químicas, resultado das reacções fluído-rocha (Guha *et al*,1983, Touray *et al*,1989).

Etapa 3 (Fase Tardia)

Episódio 5 – Formação de lentículas (nuggets) auríferos

Durante os estados tardios dos regimes tectónicos extensionais podem ocorrer em ZC novas aberturas como fissuras e/ou fracturas.

As aberturas progressivas que ocorrem nesta fase são sincronizadas com a chegada das soluções mineralizadas nesta fase tardia. O ouro ocorre sob a forma de pequenos *nuggets*. Apresentam-se geralmente associadas a elevadas concentrações de prata, o que permite uma fácil distinção das associações geradas durante a fase intermédia. Os fluidos relacionados com este episódio não apresentam, geralmente, soluções aquosas voláteis, mas apresentam níveis de salinidade variáveis e de baixas temperaturas.

Quando as aberturas tardias ocorrem numa extensão limitada, a sua materialização dá-se com a formação de um *stockwork* de vénulas de quartzo.

Em suma, a formação de depósitos auríferos com interesse económico em zonas de cisalhamento requer a conjugação de várias fases de evolução, relacionados com diversos episódios de tensão e deformação. As estruturas formadas são caracterizadas por longos processos, que em alguns casos podem durar milhares de anos. Estruturas complexas que

³ Cataclase- deformação de um rocha por fracturação e rotação dos seus constituintes, sem que ocorram recristalizações minerais significativas.

evidenciem várias fases tectónicas, oferecem muito maior potencial aurífero, na medida que albergam mais descontinuidades com potencial dilatante.

3. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

3.1. INTRODUÇÃO

As mineralizações de ouro de Santiago do Escoural, e mais precisamente as ocorrências de N^a Sra. da Boa Fé - Casas Novas, localizam-se no bordo meridional da Zona de Ossa-Morena, no Maciço de Évora, na denominada Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo.

3.2. ENQUADRAMENTO REGIONAL

A área em estudo situa-se no Maciço Ibérico (MI), o qual representa a maior parte do sector ocidental da Península Ibérica. Este maciço constitui parte da Cadeia Varisca, cuja formação está associada à colisão entre as placas Gondwanica (incluindo parte referente à América do Sul) e as placas Báltica e Laurência. O MI terá sido resultado de uma série de consequências derivadas de variados eventos geodinâmicos ocorridos desde a formação do Gondwana (final do Proterozóico) até à organização da placa Euroasiática, por meio da orogenia Alpina, passando pela orogenia varisca no Carbonico.

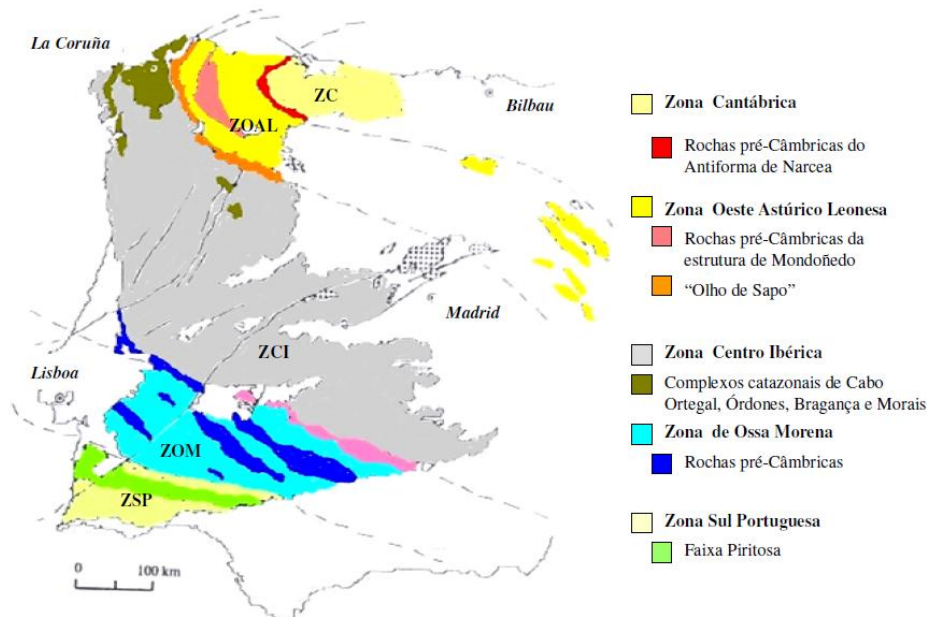


Figura 3.1 – O Maciço Ibérico e sua subdivisão em zonas, em função das suas características estratigráficas, tectónicas e petrológicas. (Adaptado de Quesada (1991, 1992) , retirado de Chichorro, 2006)

O Maciço Ibérico está dividido em zonas com diferenças significativas quanto à paleogeografia e à paleotectónica (Quesada 1991, 1992): (i) Zona Cantábrica, (ii) Zona Oeste Astúrico-Leonesa, (iii) Zona Centro Ibérica, (iv) Zona de Ossa-Morena, (v) Zona Sul Portuguesa (Figura 3.1).

3.2.1. A ZONA DE OSSA-MORENA

A Zona de Ossa-Morena (ZOM) é caracterizada por litologias de idades compreendidas entre o Proterozóico superior e o Carbónico, nas quais estão impressos testemunhos da actividade orogénica cadomiana e varisca. Representa um arco continental que se acrecionou ao Autoctone Ibérico, no período final do Proterozóico, início do Câmbrico, contexto temporal associado à orogenia Cadomiana. Está enquadrada a Norte pela Zona de Cisalhamento de Badajoz-Cordoba. Já a Sul os seus limites são coincidentes com a Zona de Cisalhamento da Ibéria Sul (*Southern Iberian*) (Crespo Blanc e Orozco 1988). A estrutura interna da ZOM reflecte, na sua essência um ciclo de convergência obliqua durante a orogenia varisca, e é formado por uma série de domínios internos, a deslocarem-se uns relativamente aos outros, segundo um regime transcurrente dominante (Silva e Pereira, 2004).

Segundo Pereira & Quesada, 2006, o processo de formação e evolução da ZOM pode ser sintetizada em quatro episódios importantes:

- i. A acreção do arco Neoproterozóico (Orogenia Cadomiana). – Importante etapa acrecional relacionada com as orogenias Pan-africana e Avaloniana-Cadomiana, e que culmina com a formação do super-contidente mega-Gondwana e dos respectivos arcos orogénicos, destacando-se entre eles o Arco Peri-Gondwanio Cadomiano, por estar representado na Zona de Ossa-Morena através de esporádicos testemunhos ígneos (rochas sub-vulcânicas e plutónicas) e através de sedimentos provenientes do seu desmantelamento (Série Negra) (Pereira, *et al*, 2008). Embora escassas, as datações existentes, realizadas nas rochas plutónicas, determinam que a actividade tectónica do arco terá tido uma duração mínima de 50 Ma, num período entre 587-540 Ma (Schäfer 1990, Ochsner, 1993). A acreção do arco provocou concomitantemente a deposição de sedimentos em bacias adjacentes, dando origem à formação de uma sequência de metassedimentos, denominados de Série Negra.
- ii. O rifting Câmbrico-Ordovícico – Este episódio marca uma dramática alteração no cenário geodinâmico da ZOM, consequência do cessar do movimento de subducção, e início da ascensão magmática de características bimodais e composição alcalina a toleítica. A actividade ígnea, associada a rifting está expressa em rochas, vulcânicas, sub-vulcânicas e plutónicas, sendo que as rochas vulcânicas apresentam-se interestratificadas em unidades sedimentares contemporâneas. Durante esta fase de rifting estão registados dois eventos ígneos distintos, que se reflectem na composição das rochas associadas a este período. Sánchez Garcia *et al* 2003 define um primeiro evento ígneo, dominado por um conjunto de rocas de características riolíticas, de idade avaliada entre 530-520 Ma (Galindo *et al* 1990, Ochsner 1993, Ordóñez 1998, Romeo 2006). O segundo evento, considerado o principal associado ao rifting, reflecte-se num magmatismo bi-modal, no entanto,

dominado por rochas de composição básica, de natureza alcalina a sub-alcalina (toleítica). Estima-se que este segundo evento terá começado 10-15 Ma depois do anteriormente referido. O término deste episódio é caracterizado por uma significativa regressão.

- iii. A margem passiva do Ordovícico-Devónico – O início desta fase de evolução caracteriza-se por um movimento transgressivo e as rochas formadas são essencialmente quartzareníticas, estando também presentes sequências argilíticas e conglomerados de origem deltaica e terrestre, depositadas por ordem decrescente de granulometria, dado o regime em vigor.

Orogenia Varisca – Esta etapa inicia-se com a colisão entre as placas Gondwana, Laurentia e Báltica, que culminam com a formação da Pangea. A convergência generalizada e consequente inversão tectónica vs espessamento crustal culmina com o desenvolvimento da cadeia orogénica Varisca. Esta, entra posteriormente num período de desmantelamento vs equilíbrio isostático com mecanismos de colapso gravitacional e extensionais da crosta, que cataclizam a fusão crustal e instalação de granitóides.

Entre as zonas paleogeográficas relativas à ZOM e à ZSP ter-se-ia desenvolvido um oceano que, actualmente, está representado nos metabasitos de Beja-Acebuches, os quais sublinham o limite de importante sutura varisca (Munhá *et al*, 1986; Quesada *et al*, 1994; Castro *et al*, 1996) Nesta fase, a ZOM está sujeita a uma tectónica dominada por translacção esquerda, em resposta a um regime de deformação essencialmente transcurrente.

3.2.2. O MACIÇO DE ÉVORA

O Maciço de Évora é considerado uma unidade individualizada da ZOM, tendo como base a sua identidade própria do ponto de vista tectono-metamórfico e estratigráfico (Chichorro, 2006). De um modo genérico, o Maciço de Évora caracteriza-se por condições metamórficas de grau baixo a intermédio, que progridem, em determinados sectores, para ambientes de ultrametamorfismo. Existe uma marcada predominância de unidades pertencentes aos Neoproterozóico e Paleozóico Inferior, frequentemente afectadas por metamorfismo Varisco regional e de contacto.. Sobre estes, assentam em discordância, rochas sedimentares e vulcânicas do Paleozóico Superior. As rochas aflorantes magmáticas são de diferentes idades e pertencentes a sistemas magmatogénicos distintos. Engloba desde rochas ígneas do Cambriaco Inferior a Médio, de tendências ácida (Metariolitos) e peraluminosa (Chichorro, 2008), frequentemente associadas a anfibólitos (Câmbriaco-Ordovícico?) representativos de magmatismo máfico toleítico do tipo N-EMORB. Actividade ígnea de idade maioritariamente viseana, também produziu rochas plutónicas e hipabissais, representadas por dioritos, tonalitos, granodioritos, gabros do tipo I (Moita *et al*, 2005) e granitos biotíticos peraluminosos. .

Actualmente estão definidas três unidades tectónicas, que subdividem o Maciço de Évora: “Terrenos de Alto grau Metamórfico de Évora” (TAME), “Terrenos de grau Metamórfico Intermédio de Évora” (TMIE) e “Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo” (ZCMN) (Pereira *et al*, 2007). O sector abarcado no presente estudo situa-se precisamente entre o TAME e a ZCMN, mais propriamente na Zona de Falha da Boa Fé (ZFBF) (Figura 3.2).

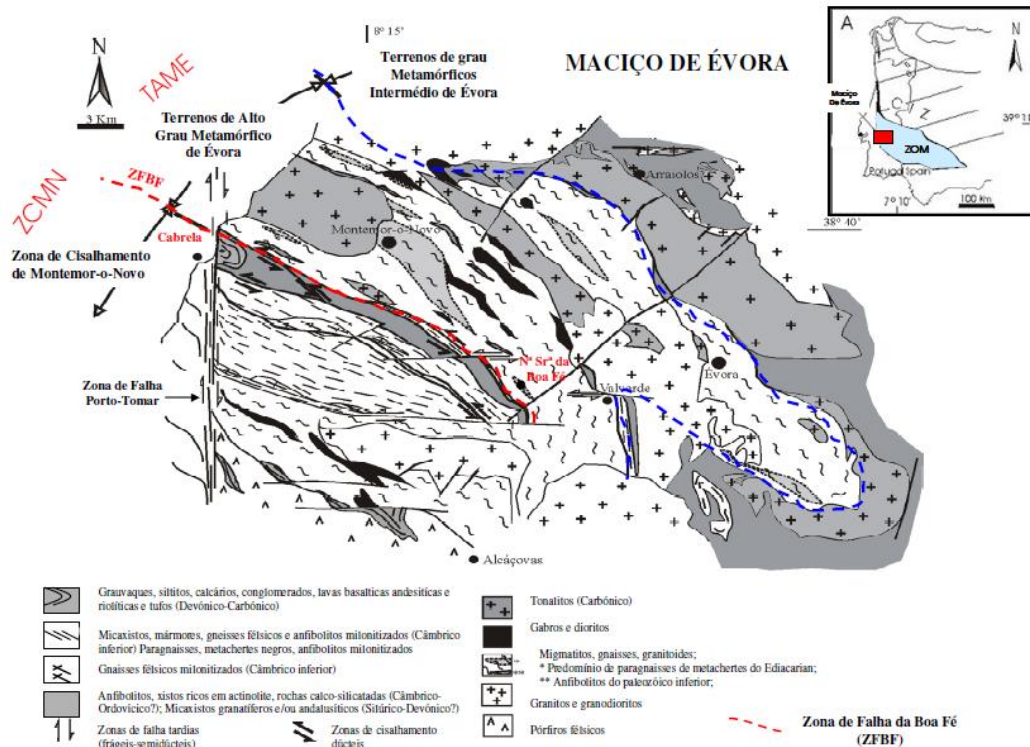


Figura 3.2 – Mapa geológico simplificado do Maciço de Évora, onde se podem observar as principais unidades tectónicas desta estrutura: Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo, Terrenos de Alto Grau Metamórfico de Évora e Terrenos de Grau Metamórfico Intermédio de Évora (em Chichorro, 2006 e Pereira *et al*, 2007).

Os Terrenos de Alto grau Metamórfico de Évora são constituídos por gnaisses, gnaisses-migmatíticos e migmatitos heterogéneos e homogéneos, associados a uma sequência de diatexitos, granitos, granodioritos, tonalitos, gabros e dioritos. Os gnaisses e os gneisses migmatíticos testemunham um metamorfismo de alta temperatura e baixa pressão (Chichorro *et al*, 2003). Os Terrenos de grau Metamórfico Intermédio de Évora abarcam uma sequência estratigráfica semelhante à da Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo. Inclui um soco Cadomiano, expresso pela Série Negra, bem como, dois complexos Ígneos-Sedimentares, o primeiro félsico e carbonatado, de idade Câmbrica, e um segundo essencialmente máfico (Câmbrico? – Ordovícico?). Estão presentes numerosos diques graníticos, granodioríticos,

tonalitos de idade Carbonífera (Pereira, *et al*, 2008), todos com deformação variável, que intruem uma sequência de rochas ígneas e sedimentares bastante cisalhadas. A Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo representa uma faixa alongada paralelamente ao orógeno essencialmente representado por um soco Ediacárico e Câmbrico, extremamente cisalhado. A sua descrição mais pormenorizada será introduzida em 3.3.1.

3.3. ENQUADRAMENTO LOCAL

3.3.1. ZONA DE CISALHAMENTO DE MONTEMOR-O-NOVO

Trata-se de uma zona dominada por rochas miloníticas afectadas por cisalhamento dúctil, essencialmente transcurrente, localmente extensional, que afectou quase toda a sequência estratigráfica constituinte desta unidade tectónica do Maciço de Évora.

Do mais antigo para o mais recente, é possível fazer a individualização de 5 unidades litoestratigráficas:

- i. “Série Negra” do Escoural – Metacherts negros, metapelitos e metagrauvaques, micaxistos, paragneisses, do Ediacárico;
- ii. Complexo Ígneo (essencialmente félsico)-Sedimentar de Monfurado do Câmbrico Inferior-Médio – Metavulcanitos félsicos, micaxistos e calcários cristalinos com metavulcanitos máficos associados;
- iii. Complexo Ígneo (essencialmente máfico-Sedimentar) do Carvalhal de idade provável Câmbrico Médio-Superior e Orodvício? - Anfibolitos, micaxistos e rochas calcossilicatadas.

Estas três unidades constituem um soco extremamente deformado e metamorfozido, sobre o qual assentam, em discordância, as duas últimas unidades da sequência estratigráfica estabelecida para a ZCMN:

- iv. Formação de Pedreira de Engenharia – Sucessão pelítico-carbonatada do Devónico médio;
- v. Formação de Cabrela – Sucessão turbidítica pelítica-grauvacóide e vulcanitos associados do Carbónico (Tournaisiano-Viseano);

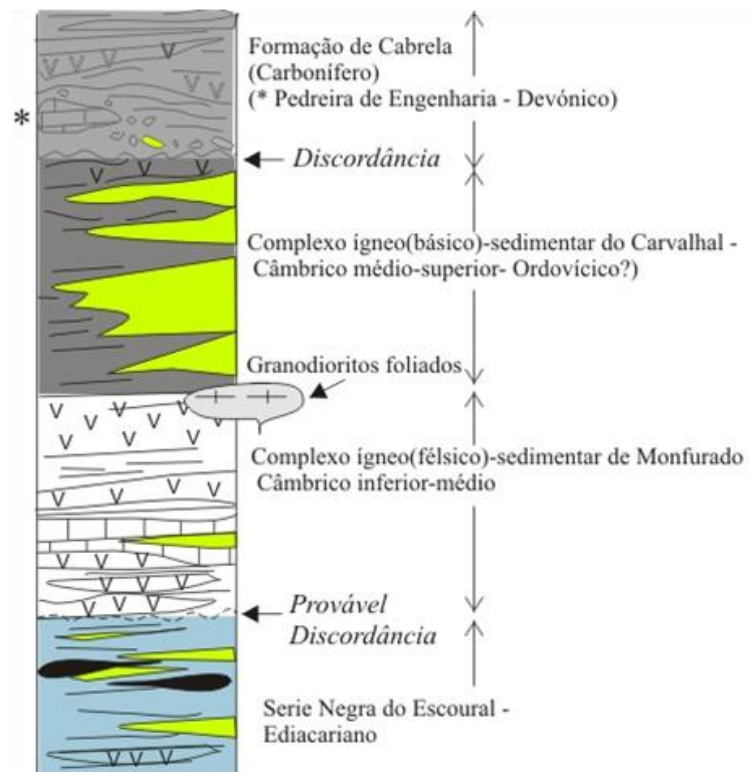


Figura 3.3 - Coluna litoestratigráfica da Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo proposta por Chichorro, 2006 e adaptada de Pereira *et al*, 2007.

A Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo é caracterizada pela presença de rochas extremamente cisalhadas, em condições de metamorfismo de fácies anfibolítica a xistos verdes com ocorrências pontuais de rochas eclogíticas (região de Safira) (Leal, 2001, Chichorro, 2006, Pereira *et al*, 2007).

Na fronteira entre a Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo e os Terrenos de Alto grau Metamórfico de Évora desenvolveu-se uma faixa relativamente estreita, com menos de 1 km de largura, onde os gradientes de deformação patentes são extremamente elevados e onde as texturas dúcteis (milonitos) partilham igual importância com texturas mais frágeis (protomiloníticas e protocataclásticas). As mineralizações em estudo estão encaixadas na ZFBF.

3.3.1.1. SÉRIE NEGRA DI ESCOURAL (EDIACÁRIO)

A Série Negra do Escoural foi atingida por metamorfismo na fácies anfibolítica estando representado por micaxistos, paragneisses quartzo-feldespáticos e metacherts grafitosos. De uma forma genérica, os protólitos da Série Negra representam uma sucessão de formações

detríticas grauvacóides com intercalações de cherts e níveis pelíticos. Segundo Chichorro, 2006 as rochas félsicas (ortognaisses feldspáticos) e básicas (anfíbolitos) associadas à Série Negra são de idade Câmbrica a Ordovícica e representam corpos subintrusivos (diques e soleiras) naquelas formações detríticas⁴.

3.3.1.2. COMPLEXO ÍGNEO (ESSENCIALMENTE FÉLSICO) - SEDIMENTAR DE MONFURADO (CÂMBRICO INFERIOR-MÉDIO)

Segundo Chichorro, 2006 este complexo está essencialmente representado por gnaisses félsicos que representam magmatismo essencialmente ácido na forma extrusiva (lavas, tufo e aglomerados piroclásticos) de natureza riolítica e riolítica, por vezes com bandado ígneo ou para-sedimentar (rochas epiclasticas). Equivalentes sub-vulcânicos surgem sobretudo em associação intrusiva (soleiras, diques) na Série Negra.

Esta sucessão complexa de metatufo ácido aparece frequentemente associada a cineritos quartzosos, rochas calco-silicatadas, arcoses grosseiras e níveis anfíbolíticos. Transita superiormente para calcários cristalinos e mármore com níveis anfíbolíticos intercalados (prováveis lavas e soleiras). Níveis félsicos subordinados surgem interestratificados nos mármore.

Registe-se que raramente as unidades apresentadas aparecem completas, ocorrendo por vezes interdigitações das sub-divisões, consequência da forte deformação, que evidenciam, como o demonstra o carácter milonítico da foliação que apresentam.

3.3.1.3. COMPLEXO ÍGNEO (ESSENCIALMENTE MÁFICO) - SEDIMENTAR DO CARVALHAL (CÂMBRICO A ORDOVÍCIO?)

Trata-se de uma formação caracterizada pelo predomínio de rochas ígneas máficas (basálticas a gabróicas) afectadas por diferentes graus de metamorfismo, desde a fácies de xistos verdes até à anfíbolítica. Surgem, em associação com metassedimentos quartzo-filiticas (micaxistos e xistos luzentes) e níveis de rochas calco-silicatadas.

Este complexo corporiza importante relevo (Serra do Carvalhal) que se estende por aproximadamente 30 km e que constitui o núcleo de megasinclinório assimétrico que distingue

⁴ Determinadas rochas verdes e félsicas associadas à Série Negra correspondem a unidades sub-vulcânicas de composição intermédia e ácida (andesitos e riolitos) carboníferos.

a estatura geral da ZCMN. Recorde-se que as mineralizações em estudo situam-se no flanco NE deste sinclínio.

3.3.1.4. FORMAÇÃO DE PREDEIRA DE ENGENHARIA E FORMAÇÃO DE CABRELA

Sequência de Sedimentos do Devónico Médio (Formação de Pedreira de Engenharia) – Sucessão turbidítica pelítico-carbonatada, formada essencialmente por pelitos com componente margosa e bancadas de espessura centimétrica de rochas detríticas de natureza carbonatada com intercalações de pelitos cinzentos e negros. Inclui ainda calcários dolomitizados maciços. No entanto estes últimos afloram apenas em localizações muito pontuais.

Complexo Vulcano-Sedimentar Carbonífero (Formação de Cabrela) – Trata-se de uma sucessão monótona e espessa de alternâncias de grauvaques, arenistos, siltitos e argilitos com intercalações de vulcanitos félsicos e queratófiros. Assenta em discordância sobre a unidade superior do Complexo Sedimentar do Carvalhal e Formação de Pedreira de Engenharia.

As unidades estão afectadas por uma clivagem incipiente, desenvolvida em muito baixo grau de metamorfismo, e ambas assentam em discordância angular sobre o soco miloitizado, representado pelas unidades Neoproterozóicas e Câmbrias referidas anteriormente.

3.3.2. SECTOR DE CASAS NOVAS – NOSSA SENHORA DA BOA FÉ (ZONA DE FALHA DA BOA FÉ)

3.3.2.1. CARACTERIZAÇÃO LITO-ESTRATIGRÁFICA E ESTRUTURAL DO SECTOR DE CASAS NOVAS

Trabalhos realizados por *Chichorro et al, 2003*, permitiram a realização de cartografia geológica, através de um corte transversal ao longo da Zona de Falha da Boa Fé (ZFBF). *Chichorro, 2006*, estendeu os trabalhos de cartografia e amostragem à envolvente da ribeira de São Brissos, e elaborou um mapa e corte geológico sintéticos do sector (Figura 3.4), o qual, grosso modo, revela as características cartográficas e estruturais do flanco NE do sinclínio de Santiago do Escoural.

O corte realizado estende-se ao longo de 700 metros, sub paralelamente à ribeira de S. Brissos. Inicia-se a Sul, nos anfibolitos do Complexo Ígneo-Sedimentar do Carvalhal, e termina a NE em quartzodioritos, já incluídos em unidades metatexíticas e diatexíticas do TAME. O referido corte intersecta as mineralizações de Casas Novas as quais afloram, embora com pouca representatividade ao longo da Ribeira, próximo de local onde esta flecte para Norte. A janela destacada na Figura 3.4. pretende enquadrar as mineralizações de Casas Novas e grosso modo

representa a zona em estudo. Ao longo do corte, e de SW para NE, assiste-se à passagem da zona da andalusite para a zona da silimanite em resposta ao metamorfismo prógrado de alta temperatura e baixa pressão (Chichorro et al., 2003).

Em seguida, descrever-se-á de forma sucinta o sector de Casas Novas-Nossa Senhora da Boa Fé, considerando as suas peculiaridades em termos estratigráficos e estruturais.

Em primeiro lugar, importa referir, que as unidades aflorantes neste sector em particular, e na Zona de Falha da Boa Fé em geral, são as mesmas descritas para a Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo (3.3.1) com a diferença, de que aqui, encontram-se extremamente condensadas, estiradas e interdigitadas devido aos fortes gradientes de deformação dúctil a frágil vigentes. Em suma, no sector em estudo, as principais unidades cartografadas pertencem à Série Negra do Escoural e ao Complexo Ígneo (essencialmente félsico) e Sedimentar de Monfurado.

No sector de Casas Novas-Nossa Senhora da Boa Fé a Série Negra do Escoural contacta a Sul com os anfibolitos da Formação do Carvalhal, como se constata pela Figura 3.4.

A Série Negra corresponde, neste sector, a um conjunto de paragneisses quartzo-feldspáticos e biotíticos (Figura 3.5. B, C, D, E, F) que à escala microscópica revelam uma textura grano-porfiroblástica a grano-lepidoblástica. Em Casas Novas os paragneisses são o encaixante dominante das mineralizações, embora estas surjam frequentemente próximo dos contactos com os diques mesocráticos e leucocráticos que serão descritos adiante.

No sector em estudo, os ortogneisses félsicos tendem a sobressair no relevo formando topos que se destacam do encaixante metasedimentar. Os ortogneisses félsicos apresentam gradientes de deformação distintos, materializados em zonas (i) onde aparentemente a deformação não produz lineação mineral forte e (ii) corredores com 5-10m, que se apresentam extremamente deformados, por vezes com texturas ultramiloníticas.

Ao longo do corte da Ribeira de São Brissos constata-se a tendência para que a foliação milonítica de N75°W 85°SSW, próximo do contacto com os anfibolitos, varie tendencialmente para atitudes de N45°-50°W, 85°SW, à medida que se caminha para NE. N30°W 75°SW é a atitude média da foliação milonítica que afecta a área de Casas Novas. A foliação tende a ser sub-vertical, com tendência para inclinar para SW admitindo variações entre N30°W 85°SW e N30°W 65°SW. Sobre o plano de foliação é possível observar-se um estiramento mineral subhorizontal ou inclinando cerca de 15 para SE. O estiramento mineral está marcado por crescimentos de agregados de biotite e silimanite (fibrolite) e pela orientação preferencial de porfiroclastos e porfiroblastos. É muito frequente encontrar a foliação rodada para direcções de N15°E ou N80W por efeitos de acidentes semi-frágeis e frágeis. O fabric dominante é milonítico

e plano-linear, e à escala microscópica, reflecte-se na transposição quase total das foliações S-C-C' e a geração de novas foliações extensionais C'.

A maioria das estruturas no sector de Casas Novas – Nossa Senhora da Boa Fé são sin-cinemáticas com o regime dúctil geral transcurrente não coaxial, evoluindo para condições progressivamente mais frágeis. A existência de contrastes na intensidade da deformação, neste sector, revela a sua distribuição heterogénea no espaço, com conseqüentes variações locais na sua geometria.

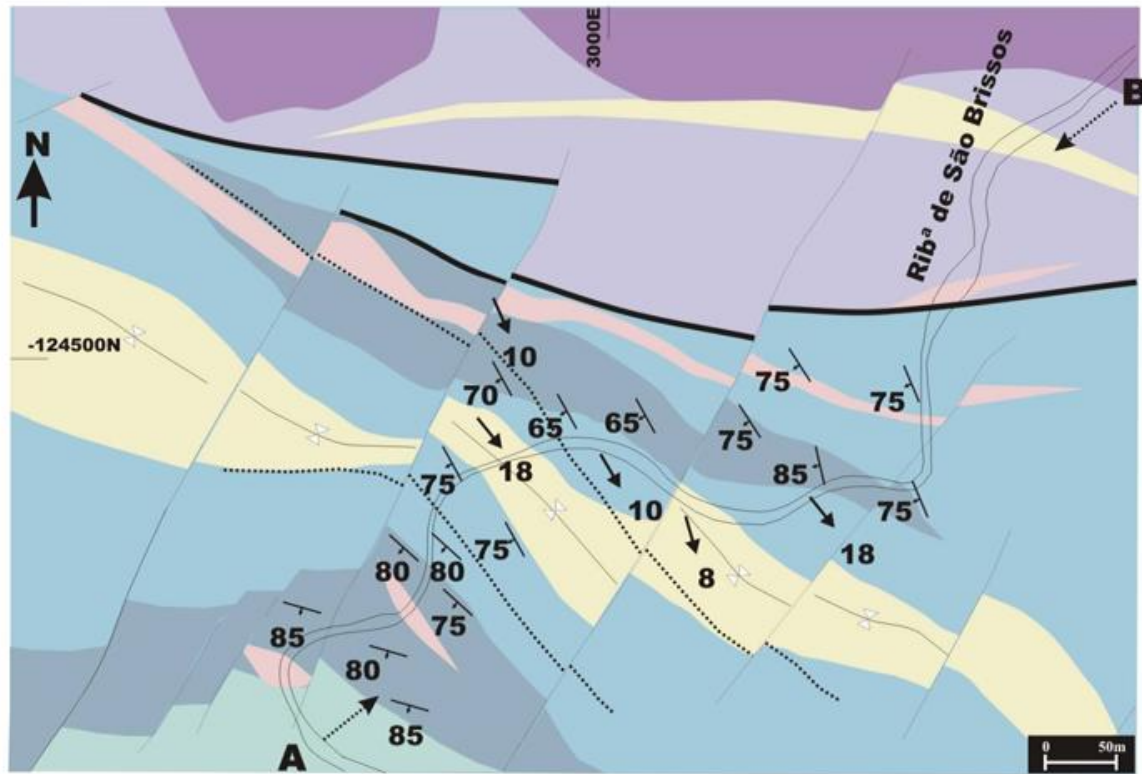
O *fabric* planar é reforçado pelo desenvolvimento de veios, vénulas e segregações leucocráticas quartzosas (\pm feldspato) com espessura milimétrica a centimétrica, em regra descontínuas e boudinadas (Figura 3.5. B, E, F). Localmente, estes veios e vénulas, concordantes com a foliação, desenham dobras intrafoliares (Figura 3.5. F). Os veios e vénulas albergam, na zona da mineralização, sulfuretos (arsenopirite e pirite) com teores de ouro importantes, o qual por vezes surge visível a olho nu. A arsenopirite, frequentemente na salbanda dos veios de quartzo pode surgir disseminada nos gnaisses (Figura 3.5. C, D).

3.3.2.2. DIQUES ÍGNEOS MELANOCRÁTICOS E LEUCOCRÁTICOS (CARBONÍFEROS)

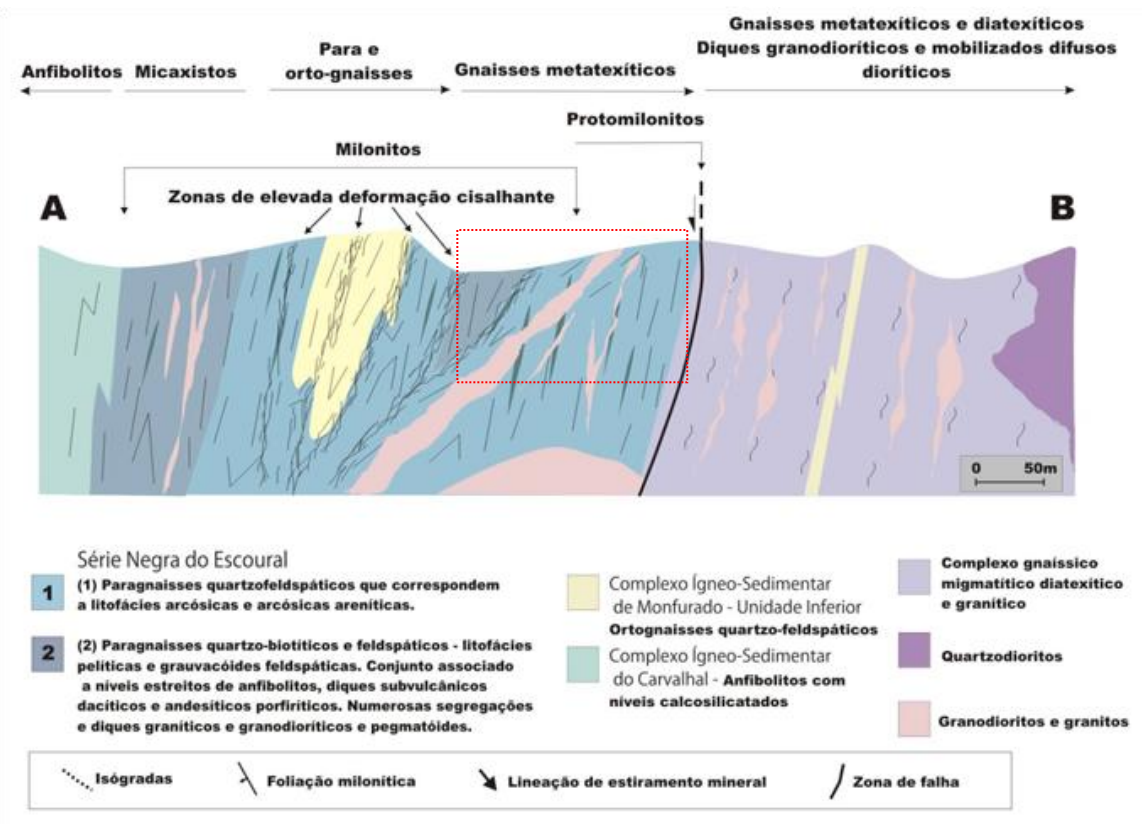
O sector em estudo é atravessado por inúmeros diques de tendência melanocrática (geralmente andesíticos – Figura 3.5 A e Figura 3.6 B) e leucocráticos (granitos e granodioritos - Figura 3.5 A e Figura 3.6 A). Os diques e segregações leucocráticas apresentam uma textura fanerítica equigranular a porfirítica. Um dos diques aflora com dimensões cartografáveis (ver figura 3.4). O dique apresenta dimensões aproximadas de 600m de comprimento e espessura variável entre os 1 e os 10m, e a sua direcção é de N75°W com inclinações para 40-60° para SSW. O granitóide cartografado corta o *fabric* milonítico encaixante gnaíssico, fazendo no plano horizontal, um ângulo de 35° no sentido anti-horário com a foliação. Estes corpos não apresentam deformação no estado sólido significativa, exceptuando a de carácter frágil, e apenas é detectável em alguns diques, um ligeiro *fabric* magmático (tectónico?), restrito aos bordos dos diques. Por vezes, as segregações graníticas surgem nos planos axiais de mesodobras e «kinks».

Os diques anteriormente descritos distinguem-se de outro tipo de intrusões ígneas no sector em estudo. Estas, correspondem a diques melano a mesocráticos com matriz fina e uma textura por vezes porfirítica. **Chichorro, 2006**, apelida estes corpos de pórfiros mesocráticos subvulcânicos e regra geral apresentam uma composição andesítica, embora também ocorram composições basálticas. São intrusões, em regra mais difusas, mas geralmente dispõem-se sob forma tabular e com espessuras que podem variar entre centimétricas a métricas.

Os contactos entre as duas fácies ígneas descritas são relativamente bruscos (Figura 3.5. A), raramente difusos, sugerindo a imiscibilidade num estado submagmático, pelo que, ambos os líquidos podem ser contemporâneos ou ligeiramente desfazados no tempo. O facto de, em alguns destes diques, crescer uma anfíbola de alta temperatura, paralelamente a uma foliação tectónica, sugere que estas rochas mesocráticas possam ser anteriores aos leucogranitóides (Chichorro, 2006), sendo essa a relação aceite no presente trabalho.



A



B

Figura 3.4 – Mapa (A) e corte geológico (B) esquemático do sector de Casas Novas – Nossa Senhora da Boa Fé (Adaptado de Chichorro, 2006)

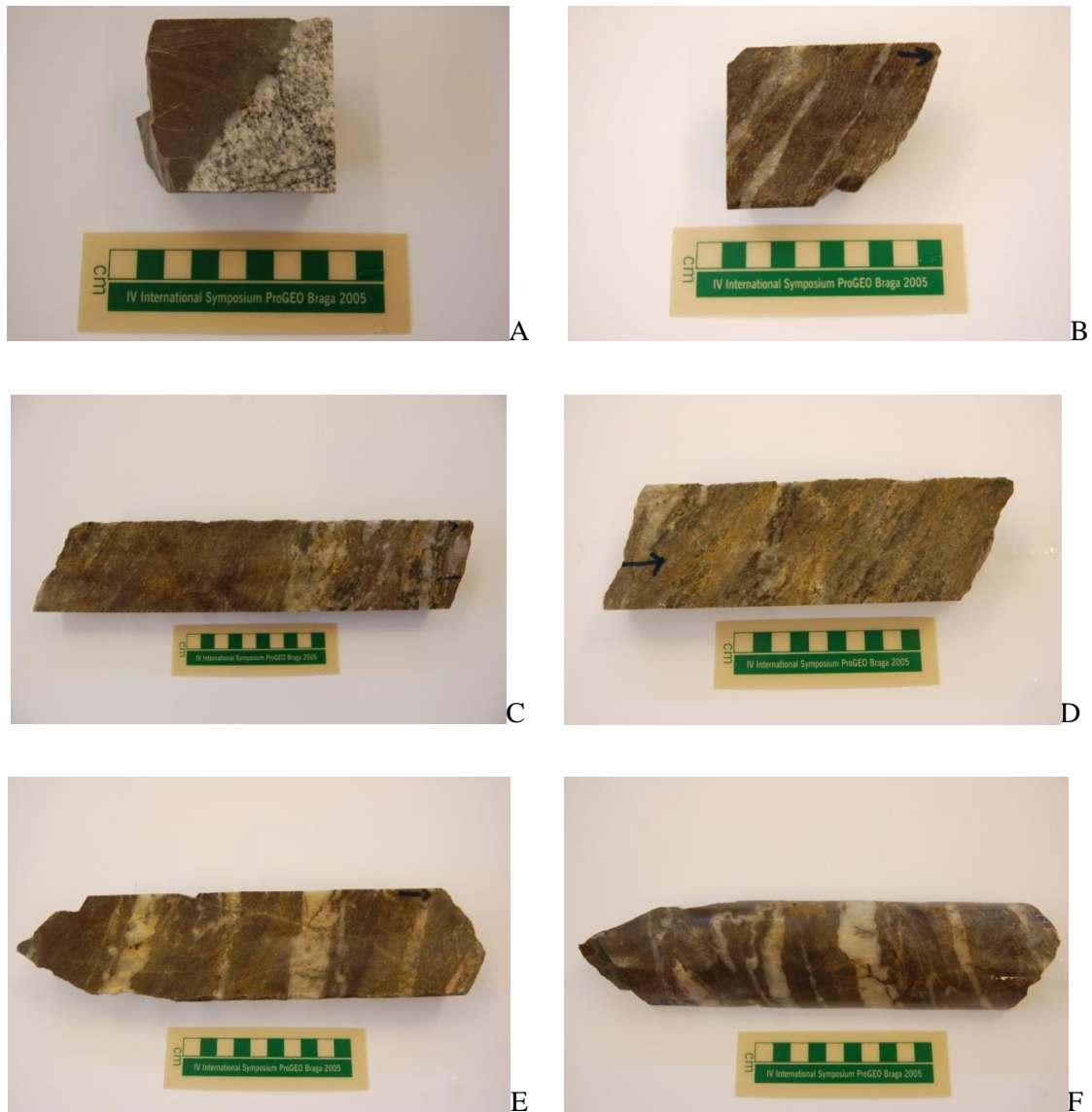


Figura 3.5 – Exemplo de amostras de carotes de sondagens, colhidas no sector de Casas Novas - Nossa Senhora da Boa Fé. A – Contacto entre os leucogranitos e andesitos. B- Típico paragneisse quatzo-biotítico com vénulas de quatzo; C – Gnaisse quatzo-feldespático e biotítico com varias gerações de veios ou segregações quatzosas. Algumas destas gerações apresentam-se mineralizadas com As e Au. A arsenopirite pode aparecer disseminada e dispersa no gnaisse. E e F - De notar que os veios ou segregações de quatzo apresentam um predisposição sub paralela à da foliação milonítica. Estas fotografias (E e F), apresentam particular importância, uma vez que permitem distinguir duas gerações de veios ou segregações quatzicas. Uma dispõem-se sub-paralelas à foliação. Já as outras apresentam-se deformadas desenahndo dobras intrafoliarias. Notar a tendência para variações na espessura dos veios individuais que surge estiramento devido à deformação progressiva. F – Observar o aparecimento de cisalhamentos discretos de carácter frágil que segmentam os veios mineralizados.



Figura 3.6 – Amostras de carotes de sondagens colhidas no sector de Casas Novas ilustrativas dos diques leucocráticos (A) e mesocráticos e melanocráticos (B). Na foto A observar a preservação de bandas isoladas do material xistento encaixante, preservadas no granitóide.

4. METODOLOGIA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1. METODOLOGIA

Perante os objectivos do presente estudo, a construção do modelo geológico das mineralizações de Casas Novas (morfologia e teores de ouro) foi realizada em duas fases, e envolveu duas abordagens distintas.

Na primeira fase construiu-se um modelo morfológico tridimensional dos principais corpos geológicos por interpolação de superfícies a partir de perfis desenhados por interpretação pericial da cartografia geológica de superfície, sondagens e sanjas. Na segunda fase procedeu-se à modelação dos teores de ouro, previamente transformados numa variável indicatriz, por simulação geoestatística (Simulação Sequencial da Indicatriz - SSI), condicionados a médias locais extraídas do modelo morfológico. Nesta abordagem geoestatística, os teores de ouro funcionam como uma variável principal (*hard data*) em contraste com a informação morfológica que tem um papel de condicionamento secundário (*soft data*). A metodologia utilizada está esquematizada no diagrama da Figura 4.1. Ao longo da primeira fase utilizou-se essencialmente o software gOcad (digitalização de perfis e interpolação de superfícies) e na segunda fase o geoMS (modelação dos variogramas e simulação propriamente dita) e o gOcad para a visualização dos resultados.

O trabalho experimental iniciou-se com o tratamento preliminar dos dados que foram cedidos pela empresa *Iberian Resources* numa Base de Dados. Foi realizada a regularização dos suportes dos teores químicos. Procedeu-se, também, à análise e recodificação dos dados geológicos com vista à sua uniformização, tendo como base estudos geológicos e cartográficos (Ribeiro, 1994; Chichorro, 2006) levados a cabo na área e antigos relatórios de prospecção mineira (Montemor Resources Inc., 1997).

Na tentativa de aferir uma relação discriminante entre a geologia (litologia e estrutura) e os teores de ouro, bem como a avaliação da capacidade de modelação de acordo com o contexto geológico (mineralizações auríferas inseridas em zona de cisalhamento de elevados gradientes de deformação), constituíram-se associações litológicas com base no conhecimento tectono-estratigráfico da área, fundamentado na bibliografia consultada (Chichorro, 2006). Simultaneamente, procedeu-se a uma análise estatística no sentido de seleccionar quais as associações litológicas que apresentavam potencial para interpretação pericial (desenho de perfis) e que evidenciavam correlação com os teores em ouro.

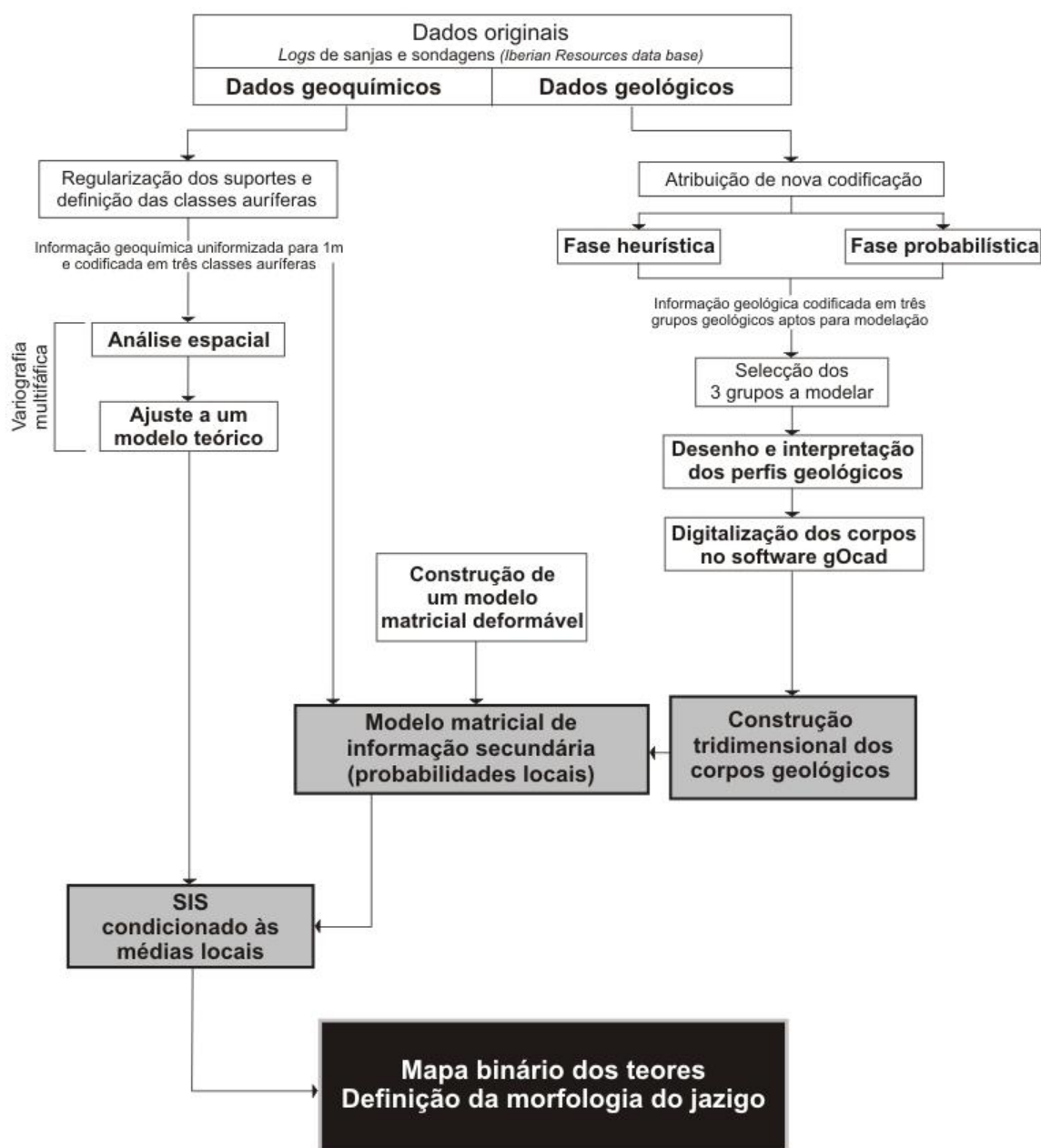


Figura 4.1 – Sequência de etapas envolvidas no presente estudo

A construção das “melhores” associações geológicas segue uma estratégia do tipo *tentativa e erro*, uma vez que testa várias alternativas coerentes do ponto de vista geológico até se obter uma solução adequada, que é validada com a discriminação que proporciona aos teores em ouro. Não foi tentado nenhum algoritmo automático de classificação dado que não existiria garantias de que a associação obtida fosse coerente do ponto de vista geológico.

Neste caso de estudo, e como será apresentado em detalhe no capítulo seguinte, foram obtidos 3 litogrupos, com elevada capacidade de modelação, e que apresentam, simultaneamente, uma relação discriminante com os dados geoquímicos disponíveis (teores em ouro e arsénio).

Uma vez discriminados e tratados estatisticamente cada um dos litogrupos, o estudo progrediu no sentido da modelação tridimensional dos objectos geológicos resultantes dos litogrupos referidos (que constituem unidades litológicas e estruturas), tendo como ponto de partida sete perfis geológicos seleccionados a partir da rede de sondagens da prospecção disponível, realizada na área de estudo.

A escolha dos perfis baseou-se nos seguintes critérios: i) quantidade de informação geológica disponível à superfície e em profundidade; ii) na continuidade lateral da amostragem (sequência contínua de perfis paralelos entre si e sub-perpendiculares à estrutura geral); iii) na qualidade e diversidade da informação, nomeadamente nos teores de ouro à superfície (sanjas) e em profundidade, iv) boas relações cartográficas e v) em sondagens entre os diferentes litogrupos discriminados.

O desenho / interpretação geológica em cada perfil foi realizado inicialmente de modo manual, e posteriormente digitalizado no gOcad. Novamente, esta etapa apresenta um elevado cariz interpretativo, uma vez que cada perfil foi desenhado com base na informação geológica contida nas sondagens e dados cartográficos de superfície (Chichorro, 2006), bibliografia e conhecimento geológico da região.

A modelação tridimensional dos corpos foi efectuada por interpolação linear dos contornos tendo-se obtido várias superfícies fechadas correspondentes aos corpos geológicos desenhados nos perfis. A modelação morfológica até esta etapa é realizada sempre em estrutura vectorial. O passo seguinte é a transformação das superfícies fechadas numa representação matricial 3D (*voxel* na terminologia do gOcad) no qual, cada célula assume a identidade geológica do corpo onde está maioritariamente contido. Esta conversão é necessária para que o modelo morfológico intervenha como informação secundária no modelo de teores.

Importa referir, que cada associação de litologias proposta pericialmente, como a que foi proposta neste estudo, resulta de interpretação geológica e que por isso é subjectiva. Este trabalho é ainda dificultado pela inconstância nas descrições geológicas, pelo contexto tectónico do sector, associado a uma distribuição muito heterogénea da deformação dúctil e frágil, e pela própria heterogeneidade primária e secundária (desencadeada por fenómenos de metamorfismo e hidrotermalismo) dos diferentes litótipos.

Terminada a fase respeitante aos dados geológicos, inicia-se o processo relativo aos dados geoquímicos que é a informação de base (*hard data*) do presente estudo. Na fase inicial, de tratamento dos dados de origem, avaliou-se a amplitude dos valores de teores de ouro existentes,

a fim de se seleccionar quais os intervalos mais representativos. O método de simulação estocástica a utilizar, Simulação Sequencial da Indicatriz (SSI), exige a transformação da variável contínua (teores químicos) numa variável categórica (em classes), para que se possa proceder ao formalismo da indicatriz (ver 4.2.1 e 4.2.3). Assim, foram definidos teores de corte para a categorização em três classes de ouro: baixos, médios e altos teores.

Seguidamente realizou-se o procedimento geoestatístico típico de análise espacial. A ferramenta utilizada foi a variografia da indicatriz com várias classes (multifásica), à qual foram ajustados os respectivos modelos teóricos.

A última etapa do presente estudo foi a aplicação do algoritmo de SSI com correcção das médias locais, no qual foram simulados N pontos numa malha regular 3D, condicionados à informação geológica obtida pelo modelo matricial 3D.

A escolha da utilização de um modelo de simulação em detrimento de um algoritmo de estimação centra-se no objectivo do trabalho, que no fundo pode ser traduzido na pretensa avaliação da probabilidade de um dado ponto estar acima ou abaixo de um dado valor z , de modo a que lhe possa ser atribuída uma classe aurífera. A obtenção desse resultado é realizada por meio de modelos de simulação (ver mais esclarecimentos em 4.2.3). Acrescenta-se que se pretende construir uma base de trabalho passível de ser sujeita a avaliação de reservas, pelo que a utilização de modelos de simulação são os mais adequados, a fim de se evitar as sub- e sobre-estimações inerentes aos processos de estimação, onde se inclui a krigagem.

4.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS GEOESTATÍSTICOS

4.2.1. FORMALISMO DA INDICATRIZ

Em casos de evidente complexidade morfológica, de que é um exemplo o caso do sistema em estudo, como definir os limites entre unidades estratigráficas ou estruturas em zonas não amostradas? Ou, como delimitar as lentículas mineralizadas, em zonas de cisalhamento afectadas por fortes gradientes de deformação, em zonas com as mesmas condições referidas anteriormente?

Nestes casos, o estudo implica a construção de modelos estocásticos, que definem a morfologia à custa do conjunto de pontos onde ocorrem as maiores probabilidades de fazer parte do objecto. Os métodos geoestatísticos permitem, através da introdução de medidas de avaliação espacial, como a covariância ou variogramas, assegurar que a probabilidade que se estima em qualquer ponto, de pertencer ao corpo, depende do grau de pertença das amostras vizinhas.

A realização deste tipo de modelos exige a construção de uma variável indicatriz, dicotómica, consequência da classificação dos dados amostrais em 1 e 0, tendo por base um determinado teor de corte z_c .

$$I(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } z(x_i) \geq z_c \\ 0 & \text{se } z(x_i) < z_c \end{cases} \quad 4.1$$

A transformação acima descrita dá origem a uma população binária pertencente à classe X e ao seu complementar X^C , no domínio $A = X \cup X^C$. Tenha-se que antes, e no término da transformação, a população é um conjunto de n amostras, localizadas em A , com $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

4.2.1.1. POPULAÇÕES MULTIFÁSICAS COM P CLASSES

A classe definida por X e X^C pode corresponder a uma determinada litologia, um tipo de minério, uma qualquer outra variável qualitativa, ou mesmo um intervalo de valores de uma variável qualitativa, como seja, por exemplo, diferentes classes de teores de ouro, como se verifica no presente trabalho. Quando assim acontece, ou seja, quando a população pode ser decomposta em p classes (fases segundo Soares, 2000 e Luís, 2004), tal que $I(x_i) = \text{prob}\{x_i \in X_k\}$ com $k = 1, \dots, p$ e $A = \{X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_p\}$, qualquer ponto x localizado em A passa a poder ser definido por um vector binário $I_k(x)$ tal que:

$$I_k(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_i \in X_k \\ 0 & \text{se } x_i \notin X_k \end{cases}, \quad X_k (k = 1, \dots, p) \quad 4.2$$

Em que X_k representa cada classe definida em A .

Segundo Luís, 2004, a variável indicatriz expressa a probabilidade de pertença de cada ponto x_i a cada fase X_k , podendo ser considerada como uma realização de uma função aleatória $I(x)$ cuja lei de distribuição binomial pode ser caracterizada, em cada fase, pelos seguintes momentos de primeira e segunda ordem:

$$m_k = E\{I_k(x)\} \quad e \quad \sigma_k^2 = \text{var}\{I_k(x)\}, \quad k = 1, \dots, p \quad 4.3 \text{ e } 4.4$$

Quando se pretende estimar a probabilidade de pertença de uma variável a qualquer fase X_k , é possível a utilização de uma combinação linear do conjunto de valores da indicatriz das amostras experimentais vizinhas, permitindo assim a aplicação dos processos de estimação

geoestatísticos, segundo o formalismo da indicatriz (Luís, 2004). Por outro lado, a utilização desta transformação dos dados permite minimizar o normal desvio sistemático das funções de distribuição de probabilidades.

4.2.2. VARIOGRAFIA

Para se compreender a morfologia característica de uma variável subdividida em classes é necessário quantificar a sua continuidade espacial. Um dos elementos mais utilizados para a avaliação da continuidade espacial é o biponto, par de pontos separados por um vector \vec{h} , que permite avaliar o modo como a continuidade de X varia nas diferentes direcções do espaço (Soares, 2000). Ainda segundo o mesmo autor, o biponto é considerado um elemento estruturante de vasta aplicação da prática geoestatística de análise de continuidade espacial de um recurso natural, uma vez que o conhecimento que se possui do recurso advém de um conjunto de amostras ou observações, regularmente discreto, limitado, e na maioria das vezes, escasso.

Para uma dada característica quantitativa $Z(x)$, os diagramas de representação de pares de pontos $Z(x); Z(x+h)$, calculados com base no biponto para diferentes valores de \vec{h} , são considerados como sendo os que contêm informação mais relevante sobre a continuidade espacial de $Z(x)$ (Soares, 2000). Tal diagrama de representação é denominado por *h-scattergram* (Goovaerts, 1997). No entanto, a análise da continuidade espacial com recurso aos *h-scattergrams* exige a realização de n diagramas, tantos quanto o número de $\vec{h}(s)$ que se pretende avaliar. Por este motivo, e para uma melhor interpretação e posterior utilização é necessário sintetizar a informação dos *h-scattergrams* em instrumentos que permitem visualizar a evolução dos dados com \vec{h} , quantificando assim, a continuidade de $Z(x)$.

No presente trabalho, o estimador utilizado foi o variograma (ou igualmente denominado de semivariograma), que resume a informação de um *h-scattergram* através da média do quadrado das diferenças entre todos os pares de pontos separados por \vec{h} .

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad 4.5$$

Onde $N(h)$ é o número de pares de pontos para cada valor de h . Semelhante análise pode ser realizada para outras direcções de h , conseguindo-se uma análise em todas as diferentes direcções do espaço.

A análise dos variogramas é condicionada pelo conhecimento prévio que se possui do fenómeno espacial em estudo. Para tal são utilizados parâmetros que permitem aferir algo relativamente ao tipo de escala à qual a transição em análise está associada:

a – amplitude – distância a partir da qual as amostras se tornam independentes, ou seja, deixam de ter correlação entre si. Corresponde à noção intuitiva de “zona de influência” de uma amostra (Pereira, 1979).

C – patamar – variância *a priori* da variável em estudo e reflecte a “dispersão” própria do fenómeno mineralizado para distâncias superiores à amplitude (Pereira, 1979).

C_0 – efeito pepita – ordenada na origem do variograma e resulta da sobreposição de microestruturas e de erros de amostragem. Quantifica a variabilidade a uma escala inferior à da amostragem (Soares, 2000).

Fenómenos geológicos particulares podem apresentar continuidade variável consoante a direcção (Soares, 2000). Veja-se o exemplo de uma lentícula aurífera. É de esperar que apresente maior continuidade na direcção paralela ao seu eixo de maior expressão, do que na direcção perpendicular a esse mesmo eixo. Quando assim acontece, a estrutura/característica diz-se anisótropa. Quando tal não se verifica, ou seja, quando o variograma apresenta o mesmo comportamento em todas as direcções do espaço, a mesma denomina-se de isotropa.

Os valores dos variogramas para diferentes passos h , de uma dada variável $Z(x)$, são representados graficamente em função do passo h . Estes valores são ajustados por uma função geral e representativa (ou soma de funções), com um número reduzido de parâmetros (efeito de pepita, patamar e amplitude). Com o ajustamento, infere-se um andamento de $\gamma(h)$ representativo para toda a área e para toda a gama de distâncias h . Esta acção é de vital importância, uma vez que permite a realização da síntese das características estruturais do fenómeno espacial, como sejam o grau de dispersão/continuidade, anisotropias, imbricamentos, num modelo único e coerente de variograma (Soares, 2000).

A escolha das funções a utilizar no ajustamento é limitada a um conjunto de modelos de funções definidas positivas, dos quais as mais utilizadas são o modelo esférico e o exponencial (respectivamente 4.6 e 4.7).

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left[1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{para } h \leq a \\ C & \text{para } h > a \end{cases} \quad 4.6$$

$$\gamma(h) = C[1 - e^{-3h/a}] \quad 4.7$$

4.2.2.1. VARIOGRAFIA DE POPULAÇÕES MULTIFÁSICAS COM P CLASSES

Na análise da continuidade espacial para populações multifásicas, ou seja, com p classes, é recorrido igualmente à covariância e/ou variogramas. A covariância de uma população multifásica pode ser interpretada como a probabilidade de duas amostras localizadas em $(x_i$ e $x_i + h)$, pertencerem à mesma fase X_k , qualquer que esta seja, $k = 1, \dots, p$, e a mesma pode ser decomposta na soma das covariâncias individuais (Almeida, 1999, Soares, 2000):

$$C(h) = \sum_{k=1}^p E\{I_k(x) \cdot I_k(x+h)\} = \sum_{k=1}^p C_k(h) \quad 4.8$$

O mesmo procedimento pode ser realizado para o cálculo do variograma de uma população multifásica.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \left\{ \sum_{k=1}^p [I_k(x) - I_k(x+h)]^2 \right\} = \sum_{k=1}^p \gamma_k(h) \quad 4.9$$

Na modelação dos variogramas, o ideal será a obtenção de um único modelo através da soma dos variogramas individuais (Soares, 2000). No entanto, dependente do número de amostras e classes definidas, a possibilidade de obtenção de um único modelo através da soma dos individuais fica condicionada, sendo a sua impossibilidade tanto mais acentuada quanto maior for o número de classes. Quando assim acontece, a caracterização deve ser realizada com recurso a mais do que um variograma multifásico, mas ainda assim, não mais do que dois (Almeida, 1999). Considerando $N(h)$ como o número de pares de pontos separados por h , o variograma multifásico correspondente pode ser obtido directamente pela seguinte expressão:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left\{ \sum_{k=1}^p [I_k(x_i) - I_k(x_i+h)]^2 \right\} \quad 4.10$$

A avaliação da continuidade espacial prossegue com a análise das anisotropias, caso existam, nas diferentes direcções, ajuste experimental de uma função teórica, e análise dos respectivos parâmetros de síntese.

Importa referir que os parâmetros que forem seleccionados vão condicionar todos os resultados futuros. A amplitude reflecte uma média da dimensão das diferentes classes ou corpos, sendo que as relações de anisotropias traduzem a variação dessas mesmas dimensões nas diferentes direcções principais. O efeito de pepita é uma medida reveladora da irregularidade morfológica no contacto entre os diferentes corpos (Soares, 2000), correspondente à heterogeneidade a pequena escala, ou seja, para curtas distâncias. Tal é reflectido nas imagens resultantes da simulação dos dados. Quando o efeito de pepita é elevado, a imagem resultante apresenta um número significativo de transições à pequena escala, e considerável irregularidade no contorno dos corpos (Almeida, 1999).

Em suma, tanto a covariância $C(h)$ como o variograma multifásico $\gamma(h)$ quantificam a variabilidade morfológica média das estruturas multifásicas (Soares, 2000), que é um dos resultados a reter no presente trabalho.

4.2.2.2. A PROBLEMÁTICA DO EFEITO DE ESCALA

Na maioria dos casos, surgem, no campo geométrico da variável em estudo, estruturas particulares como sejam conjuntos lenticulares, nos quais existe continuidade no interior de cada unidade e variação brusca de unidade para unidade (Pereira, 1979). Considere-se o exemplo de um jazigo aurífero. As descontinuidades espaciais entre corpos vão criar partições no espaço, mais ou menos independentes entre si, que apresentam uma diferenciação relativa às relações existentes entre esses mesmos espaços. No interior de cada lentícula, é de esperar que a relação entre diferentes pontos no espaço, seja mais significativa, do que em relação a pontos localizados em diferentes lentículas. Esta noção leva à ideia de que, a partir de determinada distância, essa mesma relação desapareça, e as variáveis comecem a ser independentes, no que se designa por “Fenómeno de Transição” (Pereira, 1979), o qual advém de uma diferente escala de análise.

Para além destas condicionantes naturais, pode-se facilmente idealizar lentículas de variadas dimensões e, inclusivamente, é possível conceber a existência de micro-mineralizações, que devido às suas dimensões, ou simplesmente à geometria de malha, podem não ser captadas pela amostragem. Entenda-se que, numa representação gráfica de um variograma, o primeiro ponto a que temos acesso experimental é o $\gamma(h = d)$, com d o menor espaçamento das amostras sendo que o andamento do variograma entre zero e esse mesmo ponto é desconhecido, sendo apenas possível extrapola-lo linearmente para o eixo das ordenadas, alcançando o já definido efeito de pepita.

Outro conceito, também associado à problemática do efeito de escala centra-se noutra aspecto ilustrado no variograma, a presença de estruturas imbricadas. Ocorrem quando a malha de amostragem utilizada registou, simultaneamente, duas estruturas de transição da mineralização. Ou seja, para pequenas distâncias, o variograma reflecte a transição a essa mesma escala, e para distâncias superiores à dimensão média das lenticulas, o variograma reflecte o modo como estas se estruturam entre si (Pereira, 1979) apresentando-se com descontinuidades no seu andamento, correspondendo as abcissas das inflexões às amplitudes das diferentes estruturas (Soares, 2000).

4.2.3. SIMULAÇÃO SEQUENCIAL DA INDICATRIZ

Com a simulação geostatística pretende-se gerar imagens capazes de reproduzir as características do fenómeno em estudo, como sejam a lei de distribuição, a variabilidade e a continuidade espacial. Obtêm-se várias imagens que apresentam comportamentos estatísticos iguais ao dos dados amostrais, e uma relação exacta com a informação secundária/condicionante (Goovaerts, 1997; Soares, 2000; Luís, 2004). Estes resultados são complementares ao que se pretende com a estimação, que é a caracterização das distribuições espaciais das características médias de um recurso natural. Estas características tornam a simulação capaz de construir diferentes comportamentos, inclusive os extremados, para as características de dispersão e concentração da variável em estudo, à custa de um amplo conjunto de imagens.

Existem vários algoritmos para simulação, mas no presente trabalho seleccionou-se a SSI. O princípio da simulação sequencial é bastante simples e baseia-se num condicionamento crescente à informação existente na vizinhança dos pontos a simular, que é obtido, tanto pelos valores experimentais, como pelos valores anteriormente simulados. Este procedimento é realizado em passos sequenciais sucessivos, e de acordo com a relação de Bayes:

$$F(Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N) = F(Z_1) F(Z_2|Z_1) F(Z_3|Z_1, Z_2) \dots F(Z_N|Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_{N-1}) \quad 4.11$$

Considere-se a lei de distribuição conjunta de N variáveis aleatórias, e n valores condicionantes experimentais, $F(N) = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N|n)$. O processo de simulação genérico de $F(N)$ é passível de ser resumido nas seguintes etapas:

- i. Simulação de um valor z_1 , considerando a função de distribuição cumulativa $F = (Z_1|n)$, a partir de um caminho aleatório, escolhido sobre o campo geométrico em estudo. Uma vez realizada a simulação de z_1 , o valor obtido é adicionado ao conjunto de informação condicionante, para os subsequentes passos de simulação, passando n a $n + z_1$;

- ii. Simulação de um novo valor z_2 a partir da lei condicional Z_2 , tendo por base os $(n + 1)$ valores condicionantes. Finda a simulação de z_2 , os dados condicionantes passam a ser actualizados para $(n + 2) = (n + 1) + z_2$;
- iii. Repetição do processo sequencial até se proceder à simulação completa das N variáveis.

Saliente-se que, as N variáveis aleatórias dependentes $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N$, podem ser correspondentes à mesma característica, espacialmente referenciada nos N nós do campo espacial em estudo. Caso se considerem os n valores condicionantes iniciais como correspondentes aos valores experimentais, então $F(N) = (Z(x_1), Z(x_2), Z(x_3), \dots, Z(x_N)|(n))$.

No entanto, é no desconhecimento das N funções cumulativas condicionais, em casos práticos, que se centra a dificuldade de aplicação da simulação sequencial.

$$\begin{aligned}
 & \text{prob}\{Z(x_1) < z|(n)\} \\
 & \text{prob}\{Z(x_2) < z|(n + 1)\} \\
 & \text{prob}\{Z(x_3) < z|(n + 2)\} \\
 & \quad \vdots \\
 & \text{prob}\{Z(x_N) < z|(n + N - 1)\}
 \end{aligned}
 \tag{4.12}$$

É a necessidade do conhecimento destas funções que limita a aplicação prática destes algoritmos. No entanto, **Journel e Alabert, 1989**, ou **Soares, 2001**, consideram a utilização da krigagem como a ferramenta adequada na estimativa dessas, particularmente a krigagem multigaussiana para a simulação sequencial gaussiana (SSG), a krigagem de indicatriz para a simulação sequencial da indicatriz (SSI), e ainda a estimação por krigagem simples, com ou sem variáveis secundárias para a simulação sequencial directa (SSD) (**Soares, 2001**).

4.2.3.1. SIMULAÇÃO PARA POPULAÇÕES MULTIFÁSICAS COM P CLASSES

No âmbito do presente trabalho, e dadas as especificações multifásicas da população em estudo, **Soares, 1998, 2000**, sugerem que o método de simulação mais indicado é o da SSI com correcção das probabilidades locais. Trata-se de um método com procedimento igual ao já descrito, no qual as funções de distribuição condicionais são estimadas pelo formalismo da indicatriz.

Os dados originais podem representar variáveis contínuas ou categóricas, que são transformadas, segundo o formalismo da indicatriz, em p classes. À semelhança do já descrito sobre sistemas multifásicos, para qualquer fase X_p é possível definir a média, representativa da proporção da fase p no campo geométrico em estudo, e estudar a continuidade espacial com

recurso à variografia multifásica. Os vectores obtidos com a transformada da indicatriz são os dados de entrada para este algoritmo de simulação, que pode ser definido nos seguintes passos:

- i. Para uma localização x_1 escolhida aleatoriamente dentro do campo geométrico A , cálculo da probabilidade de pertença a cada fase pelo estimador de krigagem:

$$[I_k(x_1)]^* = \text{prob}\{x_1 \in X_k\}^*, k = 1, \dots, p \quad 4.13$$

- ii. Correção das probabilidades locais (ver 4.2.3.2).

- iii. Cálculo da função cumulativa:

$$\begin{aligned} [F_1(x_1)]^* &= [I_1(x_1)]^* \\ [F_2(x_2)]^* &= [I_1(x_1)]^* + [I_2(x_2)]^* \\ &\vdots \\ [F_l(x_1)]^* &= \sum_{k=1}^l [I_k(x_1)]^*, l = 1, \dots, p \end{aligned} \quad 4.14$$

- iv. Geração de um valor s , distribuído no intervalo $[0,1]$, que determinará o valor final de x_1 , com base na pertença de s a determinada classe p , tendo como base a seguinte condição:

$$s \in [[F_{k-1}(x_1)]^*, [F_k(x_1)]^*] \quad 4.15$$

Assim, o valor simulado em x_1 é 1 se pertencente à fase k , $I_k(x_1) = 1$ e 0, $I_j(x_1) = 0$, se pertencente a qualquer outra classe distinta de k , j por exemplo, $k \neq j$.

- v. Os valores entretanto simulados, $I_k(x_1), k = 1, \dots, p$ são adicionados ao conjunto condicionante de todo o processo de simulação. O processo sequencial é repetido até se proceder à simulação completa da totalidade dos pontos existentes em A .

4.2.3.2. CORRECÇÃO POSTERIOR DAS PROBABILIDADES LOCAIS

A simulação é condicionada pelos valores de entrada e pelo incremento dos valores que vão sendo simulados ao longo do processo (Soares, 1998). Na verdade, as proporções finais de cada fase da população multifásica são extremamente dependentes da localização dos primeiros pontos escolhidos aleatoriamente para serem simulados, principalmente para as fases de menores proporções. Se os primeiros pontos seleccionados para simulação se localizarem todos na proximidade de valores experimentais, pertencentes a uma dada classe, é expectável que a proporção de valores estimados, dessa mesma fase, tenda a aumentar consideravelmente, no

decorrer do processo, podendo nunca retomar as proporções originais. Tal pode acontecer, por exemplo, quando áreas de influência de classes, de pequena representatividade, são sobreamostradas no início do processo de simulação sequencial. A consequência é a criação de novos valores simulados que apresentam logo à partida, proporções enviesadas relativas às diferentes classes, que se vão agravando ao longo do decorrer do algoritmo, com especial ênfase nas classes de baixas proporções. Para obviar este problema, **Soares, 1998**, propõe a correcção das probabilidades locais, com base nas proporções globais originais de cada classe.

Considere-se p_k como a proporção original de uma dada classe, e e_k^s como o desvio que pode ser calculado pela diferença entre p_k e a correspondente proporção, obtida num dado passo s de simulação.

$$e_k^s = p_k - p_k^s \quad 4.16$$

p_k^s é a proporção da fase k , no passo de simulação s ,

$$p_k^s = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} [I_k(x_i)]^* , k = 1, \dots, p \quad 4.17$$

onde N_s é o número de pontos estimados até ao passo s .

Deste modo, as probabilidades locais estimadas podem ser corrigidas pelos respectivos desvios calculados, do seguinte modo:

$$[I_k^s(x_i)]^* = [I_k(x_i)]^* + e_k^s , \quad k = 1, \dots, p \quad 4.18$$

O somatório dos desvios igual a zero assegura o não enviesamento da correcção que se efectua, pelo que se garante um dos objectivos principais deste procedimento, ou seja, a reprodução das probabilidades locais originais de cada uma das fases.

Nota importante: Esta correcção foi aplicada neste estudo para condicionar localmente as proporções das classes dos teores de ouro conforme os histogramas condicionais aos 3 litogrupos, permitindo o condicionamento do modelo de teores ao modelo morfológico dos litogrupos.

4.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO SOFTWARE gOCAD

O software gOcad tenta colmatar as falhas sentidas pelos utilizadores que pretendiam aliar as ferramentas CAD (*Computer Aided Design*) ao desenho de superfícies geológicas consideradas complexas. O “*Discrete Smooth Interpolation*” (DSI) constitui um método especialmente pensado para a modelação de objectos geológicos, tendo em consideração a associação dos complexos diferentes tipos de informação de cariz geológico. De seguida apresentam-se, de um modo muito sintetizado, breves noções de modelação discreta e os fundamentos do DSI, que constituem a base dos processos de modelação do software gOcad.

4.3.1. MODELAÇÃO DISCRETA (DISCRETE MODELING)

A técnica de modelação utilizada pelo software gOcad é baseada num princípio simples, passível de ser resumido por: qualquer objecto geológico pode ser representado como um conjunto finito de pontos, denominado de nós, que são ligados aos nós vizinhos. São utilizadas as seguintes notações:

$$\Omega = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N\} \text{ conjunto de nós}$$

$$N(\alpha) = \text{subconjunto de } \Omega \text{ constituído pelos vizinhos de } \alpha$$

$N(\alpha)$ representa a vizinhança de α . Os nós constituintes de Ω , ligados às respectivas vizinhanças geram um gráfico $G(\Omega, N)$ denominado de malha ou *mesh*. Tendo como base a dimensão topológica do objecto a modelar, $G(\Omega, N)$ pode constituir: (i) curva poligonal, (ii) superfície decomposta e, faces adjacentes poligonais triangulares, ou (iii) volume decomposto num conjunto de tetraedros ou células poliédricas (Mallet, 2003). Cada nó $\alpha \in \Omega$ de $G(\Omega, N)$ está associado a um conjunto finito de atributos, como sejam: (i) coordenadas de cada nó no espaço (x,y,z) , (ii) propriedades físicas, químicas, entre outras. Na prática, para cada nó $\alpha \in \Omega$, as propriedades respectivas estão agrupadas num vector $\varphi(\alpha)$, que pode ser considerado uma função vectorial definida no conjunto Ω . (Mallet, 2003) denomina de “discrete model” o conjunto composto pela função $\varphi(\alpha)$, e gráfico $G(\Omega, N)$.

4.3.1.1. DISCRETE SMOOTH INTERPOLATION (DSI)

O “discrete model” não apresenta vantagens se não existir um método matemático que permita interpolar, a qualquer nó do gráfico, as componentes/propriedades de $\varphi(\alpha)$. A maior dificuldade dessa interpolação é a necessidade de levar em consideração todos os condicionantes impostos pelos dados originais. O DSI foi desenhado para solucionar esse

mesmo problema; (i) este método é independente do tipo de gráfico (curva, superfície, volumes, ...) e do tipo de componentes de $\varphi(\alpha)$, a estimar (geométricos, físicos, químicos...); (ii) permite tomar em conta um número significativo de condicionantes a ser horado por $\varphi(\alpha)$. Acredita-se útil acrescentar que a variedade de condicionantes que podem ser tomados em consideração pelo DSI é muito vasta.

4.3.1.2. DECOMPOSIÇÃO CELULAR

Tal como explicado anteriormente, o método DSI permite que a geometria e as propriedades dos objectos geológicos, representados por um gráfico, possam ser modelados. As ligações (*links*) entre os nós de tal gráfico correspondem à topologia dos objectos.

Entre os diferentes processos de modelação da topologia, existe um denominado “*cellular decomposition*” (cujo nome provém da analogia com objectos biológicos), que se aplica particularmente à modelação de objectos geológicos.

Para uma melhor compreensão deste modelo faz-se uma comparação com a biologia. É possível decompor um qualquer órgão biológico num conjunto de células adjacentes, que podem ser transformadas, de um modo contínuo, em formas esféricas tridimensionais. Do ponto de vista matemático, tais células 3D são denominadas de “3-cells”. À semelhança das bolas de sabão, a parte exterior dessas “3-cells” é constituída por um conjunto de curvas, cuja ramificação constitui um conjunto de nós Ω . O conjunto de curvas que partilham o nó $\alpha \in \Omega$ permite que os nós vizinhos sejam alcançados e define a função $N(\alpha)$, constituinte da vizinhança de α .

De um modo semelhante é possível decompor subsuperfícies em conjuntos “3-cells”, e essas mesmas células num conjunto de “2-cells” poligonais adjacentes (com uma topologia de dimensão equivalente a 2), que podem, por sua vez, ser sucessivamente transformadas em discos 2D. Por razões práticas, a maioria das vezes, tais células 2D apresentam forma triangular.

5. TRATAMENTO DOS DADOS ORIGINAIS

5.1. INTRODUÇÃO

Os dados originais foram fornecidos numa base de dados criada pela empresa *Iberian Resources*. Nela constam todas as sondagens e sanjas levadas a cabo na área mineralizada do Escoural que a empresa achou preponderantes. Entenda-se com isto que os dados fornecidos eram em muito maior número que os necessários para o presente trabalho, e o formato em que se apresentavam não era o adequado para ponto de partida do presente estudo.

Foi, por isso, necessário realizar o pré-processamento dos dados originais, ao longo de uma sequência de etapas, de modo a torná-los aptos para o presente trabalho. Assim, numa fase inicial, toda a informação, independente do tipo passou pelas seguintes etapas:

- i. Verificação e correcção das coordenadas da boca de sondagem, comprimentos e inclinações de sondagens;
- ii. Cruzamento da informação fornecida com a área em estudo e selecção das sondagens e sanjas que se localizam na área em estudo. Este procedimento foi realizado no ArcGIS 9.2, tendo sido seleccionadas 80 sondagens e 47 sanjas.
- iii. Unificação de coordenadas para o sistema Hayford-Gauss *Datum* Lisboa (IgeoE);
- iv. Geração de dois ficheiros de dados, um referente à informação litológica e outro à informação geoquímica. Os ficheiros têm as seguintes colunas: código de sondagem/sanja, coordenada inicial, final e do ponto médio de cada troço e, respectivamente, o código geológico ou os teores de ouro. Os suportes que georeferenciam os dados têm dimensões muito variadas, quer para os códigos geológicos, quer para os teores.

A informação encontra-se dispersa por toda a área em estudo, conforme pode ser observado nas Figura 5.1 e Figura 5.2. As sondagens encontram-se alinhadas na direcção N30°E, e apresentam uma inclinação média de 45°NE; a profundidade máxima alcançada é de 220m mas, em média, ronda os 110m. As sanjas encontram-se alinhadas na mesma direcção das sondagens; o comprimento médio ronda os 80m, e o máximo alcançado é de 160m.

5.2. DADOS GEOQUÍMICOS

Para a aplicação dos métodos geoestatísticos é preferível que toda a informação esteja referenciada a um suporte de dimensão comum que a torne passível de ser correlacionada. Coloca-se assim a questão de saber qual a dimensão de suporte mais adequada.

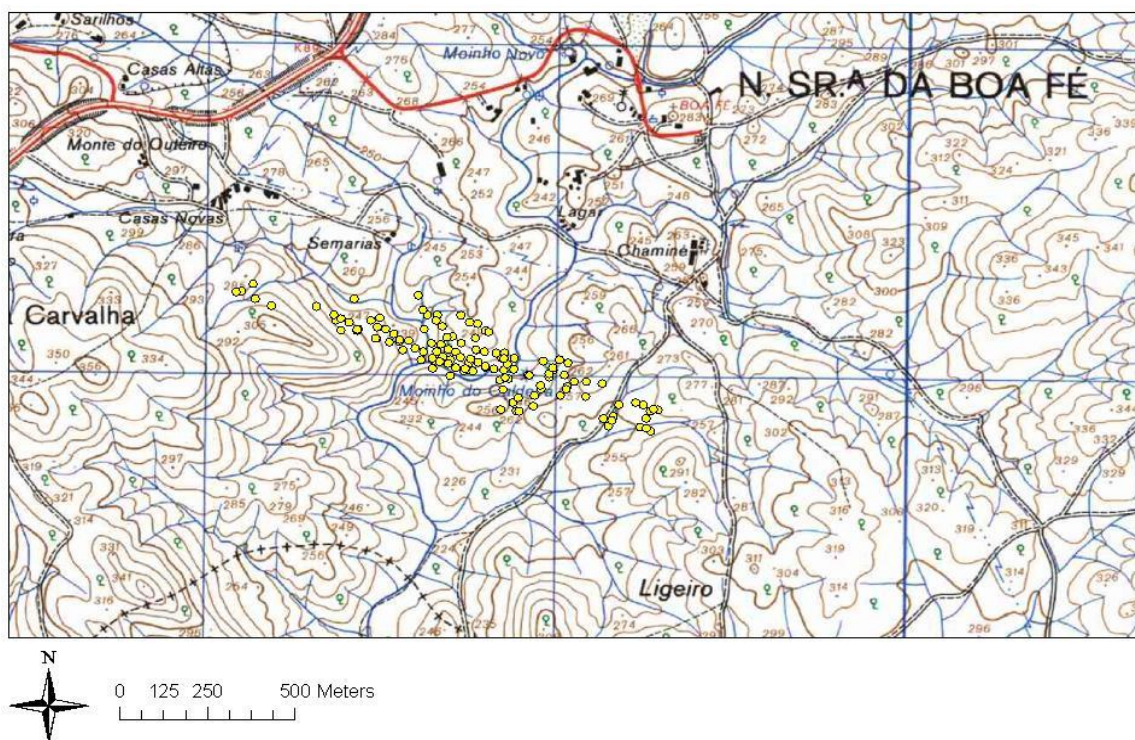


Figura 5.1 – Planta com a localização das sondagens e sanjas na área em estudo.

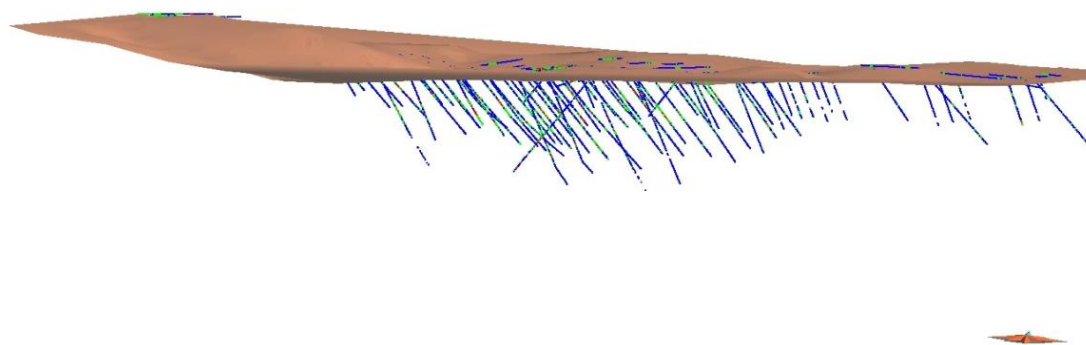


Figura 5.2 – Representação 3D das sondagens e sanjas na área em estudo (vista de SE).

Tipicamente, os teores de ouro numa mineralização aurífera seguem uma lei lognormal, o que é característica de substâncias minerais pouco abundantes e, por isso, muito valiosas. A modelação espacial de variáveis muito assimétricas é complicada, porque a análise de continuidade espacial é muito afectada pelos valores anómalos e porque se for feita estimação existe enviesamento dos valores extremos (subestimação dos teores mais elevados), neste caso os teores mais interessantes do ponto de vista económico. Por esta razão, estas variáveis muito assimétricas são modeladas por classes segundo o formalismo da indicatriz, podendo numa fase complementar serem simulados / estimados os teores condicionados às classes.

Se o estudo for pensado para trabalhar com uma variável indicatriz, em vez dos teores propriamente ditos, como é o caso do presente trabalho, **Srivastava (2005)** sugere a análise preliminar dos teores de ouro num histograma cumulativo a fim de se poderem definir intervalos.

Na Figura 5.3 –representa-se o histograma cumulativo dos teores em ouro na área em estudo realizado com os dados originais. A observação do gráfico mostra a existência de duas populações: acima e abaixo de 0,1 g/ton, respectivamente, população de altos e baixos teores auríferos.

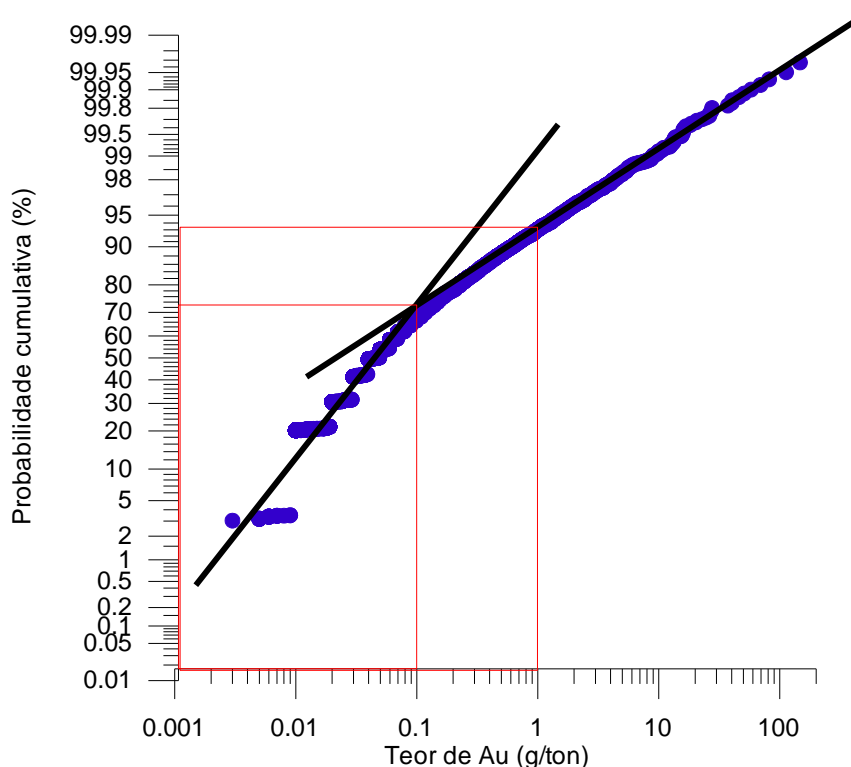


Figura 5.3 – Histograma cumulativo de teores de ouro

Os teores de corte que permitem a definição das classes são normalmente estabelecidos de acordo com critérios económicos. Uma vez que o objectivo do presente trabalho não é o de avaliação de reservas, mas a modelação da morfologia da mineralização em estudo, optou-se por considerar três classes de teores (baixos, médios e altos). Um dos teores de corte é precisamente 0,1g/ton, conforme é recomendado pelo gráfico. Para discriminar especialmente os teores mais altos, optou-se por subdividir a classe de teores mais altos, acima de 0,1g/ton, em duas classes, tendo-se estabelecido o valor de 1g/ton como valor de corte para a distinção entre a classe média e alta de teores auríferos. Embora a evidente discrepância entre as proporções de cada classe, decidiu-se manter as classes definidas, para uma mais fácil visualização da

distribuição espacial dos teores auríferos. A proporção das classes em comprimento de suporte face ao comprimento total amostrado encontra-se representada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Classes de ouro, intervalos e representatividade.

Classe	Teores (g/ton)	Representatividade
1	$\leq 0,1$	$\approx 74\%$
2	$> 0,1$ e ≤ 1	$\approx 22\%$
3	> 1	$\approx 4\%$

Seguidamente foi necessário proceder-se à avaliação do impacto que cada dimensão de suporte iria ter na proporção final de cada classe. A problemática da dimensão do suporte centra-se na perda ou repetição desnecessária de informação. Se a dimensão do suporte é muito elevada face aos dados originais, o detalhe da informação dos suportes de menor dimensão desaparece. Por outro lado, a escolha de um suporte com dimensão muito inferior à dimensão média dos dados originais, irá originar a repetição de informação o que não corresponde à realidade.

Com base nestes pressupostos, em primeiro lugar foi determinada a dimensão média dos dados geoquímicos iniciais que é de aproximadamente 2,5m. Seguidamente, foi realizada a transformação dos dados para um suporte comum, tendo sido testadas diversas dimensões. O procedimento realizado e respectivos resultados estão ilustrados na Figura 5.4 e Figura 5.4.

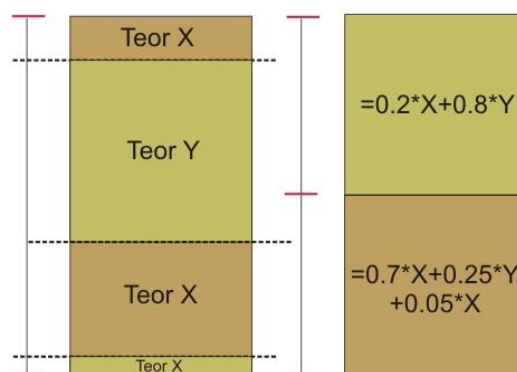


Figura 5.4 – Exemplo do procedimento para a uniformização dos suportes dos dados geoquímicos.

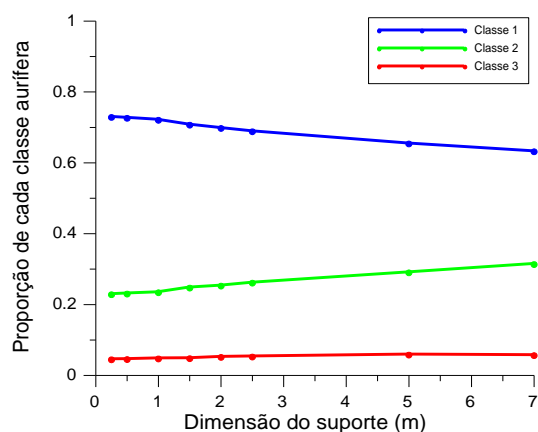


Figura 5.5 – Proporção de cada classe em função da dimensão do suporte.

Considerou-se adequada a dimensão do suporte, a maior dimensão onde se observa que a proporção de cada classe é aproximadamente constante. Tal significa que a escolha de determinada dimensão, em detrimento de outra, não apresenta consequências significativas, quanto à proporção das classes relativamente à informação original. Face a estas considerações optou-se pelo suporte de 1m.

5.3. DADOS GEOLÓGICOS

Relativamente aos dados geológicos foram efectuadas duas análises preliminares, em conjunto e de forma não dissociada.

Em primeiro lugar procedeu-se a uma análise heurística, na qual tentou encontrar-se uma associação entre as diversas terminologias e descrições geológicas encontradas na base de dados (provavelmente resultante do envolvimento de várias empresas e técnicos), e a descrição litológica, estrutural e textural das sondagens e a tectono-lito-estratigrafia definida para a região de Montemor-o-Novo, segundo a bibliografia consultada. Desta fase resultaram litogrupos de designações geológicas, definidas com base na bibliografia e conhecimento prévio da região, com uma possível relação com os dados geoquímicos.

Para quantificar a correlação entre os litogrupos e os teores em ouro, e com isso utilizar a informação geológica propriamente dita na modelação dos teores em ouro como informação indirecta (*soft data*) fez-se uma análise estatística com o bi-histograma entre estas duas variáveis. Como se verá seguidamente, esta análise permitiu reagrupar os litogrupos de forma mais restrita.

5.3.1. ANÁLISE HEURÍSTICA

Tal como já foi referido, os dados disponíveis para o presente estudo resultam de várias campanhas de prospecção mineira. Os trabalhos de prospecção e avaliação de recursos (inferidos e provados) desenvolvidos por cada uma das empresas foi variando com o tempo, consoante os objectivos a alcançar, muito dependentes do estado de conhecimento da área, das jazidas e do valor dos metais no mercado. A título de exemplo, a *Iberian Resources* actual detentora da concessão optou por organizar toda a informação, mesmo a obtida pelas empresas anteriores (malhas de geoquímica de solo, amostragem de sanjas e sondagens), numa base de dados, adaptando-a a um sistema próprio de classificação. Por conseguinte, no presente trabalho a terminologia geológica de base (caracterização litológica e estrutural das sanjas e sondagens) é a utilizada por esta empresa, e baseia-se numa compilação de 39 itens descritivos (Apêndice, Capítulo 5 – Tabela 5.1).

Uma vez que se pretende verificar a existência de correlação entre os dados geoquímicos (teores de ouro) e os diferentes descritores geológicos (litótipos e estruturas), foi indispensável uma primeira revisão da terminologia utilizada para reduzir amplitude de descrições, algumas muito pouco representativas. Este exercício deve ser analisado com os respectivos graus de liberdade inerentes à complexidade geológica da Zona de Falha da Boa Fé, nomeadamente através da presença de rochas na fácies anfibolítica e anfibolítica alta (micaxistos, paragneisses, ortogneisses, metatexitos e diatexitos), cortados por numerosos corpos de granitóides e rochas subvulcânicas, numa zona de elevados gradientes de deformação dúctil e frágil com diversos tipos de tectonitos (milonitos, protomilonitos e cataclasitos) e com processos hidrotermais e metassomáticos envolvidos na transformação dos protólitos. Procurando analogias entre a descrição litológica, estrutural e textural das sondagens e a tectono-lito-estratigrafia definida para a região de Montemor-o-Novo (Carvalhosa *et al*, 1969; Carvalhosa, 1977; Carvalhosa, 1983; Faria, 1988; Carvalhosa e Zbyszewski, 1994; Ribeiro, 1994; Faria *et al*, 1997a; Faria *et al*, 1997b; Chichorro *et al*, 2004; Chichorro, 2006; Pereira *et al*, 2007; Moita, 2008) chegou-se, numa fase inicial, a um compromisso de reduzir as 39 designações encontradas inicialmente para apenas 8 litogrupos.

5.3.1.1. CONSTITUIÇÃO DOS LITOGRUPOS

Na constituição dos litogrupos de descrições e terminologias geológicas que servirão de base para o presente estudo, foi necessário observar correlação com os teores e, na medida do possível, ser coerente com a litoestratigrafia, metamorfismo e tectónica descritas por Chichorro *et al*, 2004, Chichorro, 2006 e Pereira *et al*, 2007, para a Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo em geral, e para o sector de Casas Novas em particular.

Dada a complexidade geológica evidenciada, cada litogrupo deve ser visto como uma associação de marcadores litológicos e/ou estruturais, tendo por base os mesmos critérios estabelecidos por aqueles autores. A cada litótipo fez-se corresponder uma determinada posição na coluna lito-estratigráfica estabelecida para a região, Figura 3.3, tendo sido estabelecidos 6 litogrupos que basicamente se dividem entre representantes da sedimentação no Ediacárico, testemunhos dos processos ígneos e sedimentares do Câmbrio e casos concretos relacionados com a actividade ígnea no carbonífero.

Foram ainda definidos mais dois litogrupos, onde o primeiro refere-se às amostras que manifestamente mostrem uma relação entre a existência de veios ou vénulas de quartzo e a presença de arsenopirite (aurífera ou não) e/ou ouro livre e os veios de quartzo que manifestamente não apresentem qualquer relação com a mineralização, geralmente veios tardios de quartzo leitoso estéril e frequentemente associados aos acidentes mais frágeis. No entanto, a informação dos *logs* de sondagem não permite uma avaliação correcta do tipo de veio identificado, pelo que a sua discriminação não foi efectuada. O litogrupo em falta foi estabelecido como forma de delimitar no espaço as principais zonas de falha semi-frágil e frágil que afectam as rochas miloníticas. O objectivo é o de estabelecer eventuais relações de controlo genético entre estas zonas de deformação descontínua e as mineralizações. Por outro lado é importante determinar a forma como estes acidentes afectam por translação e rotação as caixas mineralizadas, de certa forma interferindo com a sua orientação no espaço, eventualmente perturbando eventuais anisotropias regionais de teores.

As designações originais, respectiva interpretação e os oito litogrupos agora definidos encontram-se sintetizados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Síntese das associações geológicas estabelecidas

Litótipo	Provável protólito	Provável posição na coluna lito-estratigráfica	Litogrupo
Rochas de tendência leucocrática. Granitos, leucogranitos, Granodioritos, Riolitos, Riodacitos; Aplitos, Pegmatitos	Rochas ígneas plutónicas, hipabissais e subvulcânicas	Rocha Ígneas Carboníferas	4a e 4b
Rochas de tendência melanocrática e mesocrática. Anfibolitos, matabasaltos, metaandesitos, metadacitos	Rochas intrusivas e extrusivas; basaltos, gabros, andesitos e dacitos	Provável Câmbrico médio a superior e representantes de magmatismo carbonífero	3
Paragneisses quartzo-feldspáticos	Arcoses (extrusivas ou intrusivas)]	Provável Câmbrico Inferior	1b
Ortogneisses félsicos quartzo-feldspáticos	Riolitos e Riodacitos (fácies extrusivas e subvulcânicas)	Câmbrico inferior a Câmbrico médio	2
Paragneisses biotíticos e quartzo-feldspáticos, micaxistos quartzo-filitos e quartzitos negros.	Grauvaques, pelitos e chertes negros	Ediacário	1a
Objectos estruturais			
Veios ou vénulas de quartzo associados á presença de arsenopirite (aurífero ou não) e/ou a ouro livre			5
Zonas de falhamento semi-frágil e frágil	Protocataclisitos, cataclisitos, Brechas de falha. Intervalos sem recuperação de testemunho visivelmente associados a zonas de esmagamento.		6

5.3.1.2. PROBLEMÁTICA NA CONSTITUIÇÃO DOS LITOGRUPOS

Pelas razões acima já descritas, surgiram algumas incertezas durante a ponderação dos diferentes litogrupos. Analise-se que, devido ao elevado grau metamórfico que as rochas evidenciam, é difícil estabelecer se um paragneisse pertence aos complexos ígneos-sedimentares do Câmbrico ou à Série Negra. No entanto, **Chichorro, 2006**, através de análise micro-petrográfica das rochas da Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo, descreve a tendência das rochas sedimentares Câmbricas (essencialmente arcoses) apresentarem um carácter textural quartzo-feldspático granoblástico mais vincado do que os representantes da Série Negra, os quais revelam tendencialmente paragénese biotíticas quartzo-feldspáticas expressas num carácter mais grano-lepidoblástico ou grano-nematoblástico.

Outro problema reside no carácter heterogéneo da distribuição da deformação dúctil (assim como da deformação frágil) dentro da própria Zona de Falha da Boa Fé, que é vista como uma zona de elevados gradientes de deformação. Em várias secções das sondagens, são descritas rochas félsicas e andesíticas, geralmente porfiríticas, que na realidade, na ausência de relações de corte óbvias, e sem estudos petrográficos e geoquímicos, tanto podem pertencer aos complexos ígneos Câmbricos como aos Carboníferos. Devido precisamente ao carácter heterogéneo e progressivo da deformação, e ao carácter sincrónico entre a deformação transcurrente e parte do magmatismo carbonífero, muitas das segregações magmáticas com esta idade podem apresentar um *fabric* milonítico, reproduzindo o *fabric* das rochas félsicas e

básicas Câmblicas. No entanto, os corpos ígneos carboníferos (diques ou segregações de rochas subvulcânicas), apesar de poderem estar afectadas por cisalhamentos discretos sobretudo nas zonas de contacto com o encaixante, apresentam-se, em regra, menos deformados do que as rochas ígneas Câmblicas, o que pode ser usado como critério de distinção.

Outro problema a registar centra-se no desconhecimento do significado da nomenclatura analisada. Por desconhecidas entendam-se nomenclaturas, que, com base na legenda litológica, gentilmente cedida pela empresa, não foram possíveis de decifrar. A conversão de nomenclaturas desconhecidas ou incertas para os litogrupos criados, foi realizada com base na análise dos *logs*, das sondagens e sanjas, atribuindo-se a nomenclatura do litogrupo que ocorria imediatamente antes ou depois da amostra de classificação desconhecida ou incerta. Embora se possa incorrer em alguns erros de classificação, dado o número de ocorrências em que foi necessário realizar este procedimento (13 em 5797), tal erro é considerado desprezável.

É necessário referir, também, a alteração efectuada às amostras classificadas como solo alterado. As nomenclaturas OCY, OSL e SCY foram interpretadas como referentes a produtos de alteração, exclusivamente devido à meteorização (solo). No entanto, verificou-se a existência de classificações idênticas a vários metros de profundidade, o que constitui, por si só, uma incoerência com a interpretação anteriormente referida. Assim sendo, e uma vez mais, com base na informação e conhecimento geológico da zona, assume-se que as classificações de “solo alterado”, a mais de 10 m de profundidade são representativas de provável argila e brecha de falha, passando a assumir a nomenclatura ZFZG, e a pertencer ao litogrupo definido como 6.

5.3.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi realizada uma análise estatística para relacionar os dados geológicos e as três classes de ouro. Para cada designação original (ou seja, da base da dados da *Iberian Resources*) foram contabilizadas as suas ocorrências, ou seja, o número de vezes que foram identificadas na totalidade das sondagens e medidos os respectivos comprimentos. Os comprimentos foram discriminados de acordo com as classes de ouro definidas, de modo a identificar-se qual a percentagem (relativa ao comprimento total da sondagem) referente a cada. Os resultados estão sintetizados na Tabela 5.2 do Apêndice do Capítulo 5.

Seguidamente, foi realizado o mesmo procedimento para os 8 litogrupos definidos na análise heurística. Pretendia-se avaliar a representatividade de cada litogrupo nas classes definidas, e com isto justificar, de certo modo, a sua génese e a metodologia proposta para este caso de estudo. Caso se verificasse que os corpos geológicos, correspondentes aos 8 litogrupos, não discriminassem os teores em ouro não existia qualquer vantagem na sua utilização como

informação secundária. Compreenda-se que a vantagem da informação secundária é fornecer informação indirecta, neste caso pericial, nos pontos do espaço onde não existem sondagens/sanjas. Os resultados são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Caracterização da ocorrência e representatividade dos litogrupos definidos na fase heurística.

Litogrupo	Nº ocorrências	Classe Au (m)			Comprimento total (m)	Classe Au			Desvios		
		Baixo	Médio	Alto		Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
1a	1808	3662,17	1038,52	205,62	4906,31	0,746	0,212	0,042	0,4	-1,7	1,5
1b	91	112,82	62,28	10,90	186,00	0,607	0,335	0,059	-18,4	55,5	42,0
2	1982	3185,09	1030,53	210,11	4425,73	0,720	0,233	0,048	-3,2	8,1	15,0
3	382	303,18	231,46	32,81	567,45	0,534	0,408	0,058	-28,1	89,4	40,1
4a	346	1091,31	112,71	18,72	1222,74	0,893	0,092	0,015	20,1	-57,2	-62,9
4b	61	93,25	28,25	2,50	124,00	0,752	0,228	0,020	1,2	5,8	-51,2
5	35	25,97	11,13	5,90	43,00	0,604	0,259	0,137	-18,8	20,2	232,4
6	132	382,60	50,75	5,25	438,60	0,872	0,116	0,012	17,3	-46,3	-71,0
Total		8856,39	2565,63	491,81	11913,83	0,743	0,215	0,041			

Uma cuidada análise à representatividade dos litogrupos constituídos na fase heurística (Tabela 5.3), conjuntamente com a informação geológica da área, conduziram à necessidade de redução dos litogrupos. A dificuldade em modelar a 3D todos estes litogrupos deve-se, naturalmente, à elevada complexidade da deformação dúctil e/ou frágil que afecta estes litótipos, nomeadamente a existência de macro-meso dobramentos associados ao *fabric* milonítico. Por esta razão os litogrupos 1 (xistos e paragneisses da Série Negra) e 2 (paragneisses e ortogneisses félsicos do Câmbrico) foram reagrupados para o mesmo litogrupo. Quanto ao litogrupo 5 (veios de quartzo), apesar de discriminar a classe 3 (altos teores de ouro), representam apenas 43 m do total de 11914 m de amostras, cerca de 0,3%. Embora fosse intenção a modelação dos veios mineralizados, o facto é que a sua representatividade saiu subdimensionada dado o suporte da base de dados original⁵. Daqui advém também o facto de ser praticamente impossível a sua diferenciação e extracção dos restantes dados. Esta acção seria vantajosa, uma vez a inserção deste litogrupo, que discriminar perfeitamente a classe 3, num litogrupo que apresenta comportamentos estatísticos contrários, vai de alguma forma, enviesar a informação de partida. No entanto, a impossibilidade de tal acção é assumida, como também as consequências da mesma. O mesmo acontece com o litogrupo 6, apesar de uma maior representatividade. No

⁵ Na base de dados da empresa *Iberian Resources* apenas constam registos geológicos cujo suporte apresenta dimensão superior a 1m. Crê-se que todas as litologias ou estruturas geológicas cuja dimensão seja inferior a 1m, não tenham sido consideradas, ou incluídas com outra nomenclatura.

sector em estudo, a espessura das zonas de deformação semi-frágil e frágil que afectam as rochas miloníticas (planos de falha e zonas de cataclase) é geralmente inferior a 1m. Por impossibilidade de correlação espacial das descontinuidades frágeis não foi possível a sua modelação.

O término desta fase é realizado com a definição dos litogrupos finais a modelar, e a avaliação da sua representatividade, tendo como base ambas as fases deste processo. Ficaram estabelecidos 3 litogrupos a modelar a que correspondem os códigos 1, 3 e 4. Os litogrupos 3 e 4 são os originalmente definidos, sendo que o 4 é a união dos litogrupos 4a e 4b. Já o litogrupo 1 é a reunião de todos os litogrupos restantes, uma vez que a modelização dos litogrupos 2, 5 e 6 não foi considerada viável. Os resultados para os 3 litogrupos finais são apresentados na Tabela 5.5 e Tabela 5.5.

Tabela 5.4 – Síntese das associações geológicas estabelecidas para os litogrupos a modelar

Litótipo	Provável protólito	Provável posição na coluna lito-estratigráfica	Litogrupo original	Litogrupo a modelar
Rochas de tendência leucocrática. Granitos, leucogranitos, Granodioritos, Riolitos, Riodacitos; Aplitos, Pegmatitos	Rochas ígneas plutónicas, hipabissais e subvulcânicas	Rocha Ígneas Carboníferas	4a e 4b	4
Rochas de tendência melanocrática e mesocrática. Anfibolitos, matabasaltos, metaandesitos, metadacitos	Rochas intrusivas e extrusivas; basaltos, gabros, andesitos e dacitos	Provável Câmbrico médio a superior e representantes de magmatismo carbonífero	3	3
Paragneisses quartzo-feldspáticos	Arcoses (extrusivas ou intrusivas)]	Provável Câmbrico Inferior	1b	1
Ortogneisses félsicos quartzo-feldspáticos	Riolitos e Riodacitos (fácies extrusivas e subvulcânicas)	Câmbrico inferior a Câmbrico médio	2	
Paragneisses biotíticos e quartzo-feldspáticos, micaxistos quartzo-filitos e quartzitos negros.	Grauvaques, pelitos e chertes negros	Ediacárico	1a	

Tabela 5.5 – Representatividade dos litogrupos finais a modelar.

Litogrupos finais	Classe Au			Litogrupos (Tabela 5.3)
	Baixo	Médio	Alto	
1	0,737	0,219	0,044	1a, 1b, 2, 5 e 6
3	0,534	0,408	0,058	3
4	0,880	0,105	0,016	4a e 4b

Os 3 litogrupos finais, sustentados tanto pelo conhecimento e indicações geológicas da região, como pelos dados estatísticos da relação com as classes de ouro, evidenciam discriminação relativamente aos teores de ouro sustentando desta forma a sua utilização para a avaliação da morfologia da mineralização em estudo.

6. MODELAÇÃO 3D DOS CORPOS GEOLÓGICOS

Os dados originais correspondem a uma área de estudo relativamente alargada, aproximadamente 1200m por 550m, atingindo a profundidade máxima de 220m. Para a realização do presente trabalho, que tem de ser encarado como um trabalho de investigação e, por isso, exploratório de uma metodologia, foi seleccionada uma área muito mais restrita onde se concentra a maioria da informação, com cerca de 235m por 200m de extensão na horizontal e 155m de profundidade.

As etapas envolvidas na construção dos corpos geológicos a 3D, correspondentes aos litogrupos, são as seguintes: i) selecção de perfis; ii) desenho dos corpos geológicos nos perfis; e iii) interpolação e fecho de superfícies; iv) conversão para uma estrutura matricial.

6.1. SELECÇÃO DE PERFIS

A selecção dos perfis é uma etapa muito importante na medida em que condiciona todos os resultados futuros. Dada a complexidade geológica da região (zona de cisalhamento com deformação contínua com comportamento alternado entre o frágil e dúctil), a modelação tridimensional dos litogrupos inicia-se pela respectiva interpretação e desenho geológico em diferentes planos / perfis.

A escolha dos perfis baseou-se nos seguintes critérios: i) quantidade de informação geológica disponível à superfície e em profundidade; ii) continuidade lateral da amostragem (sequência contínua de perfis paralelos entre si e sub-perpendiculares à estrutura geral); iii) qualidade e diversidade da informação, nomeadamente nos teores de ouro à superfície (sanjas) e em profundidade, iv) sondagens onde sejam bem visíveis as transições entre os litogrupos, e v) perfis já realizados pela empresa de prospecção *Montemor Resources Ltd.* (Chichorro & Young, 1997).

Ao todo foram seleccionados 7 perfis, sub-paralelos ao denominado 3, da empresa *Montemor Resources Ltd*, que se encontram localizados no espaço como se ilustra na Figura 6.1 e seleccionadas as sondagens e sanjas na respectiva área de influência.

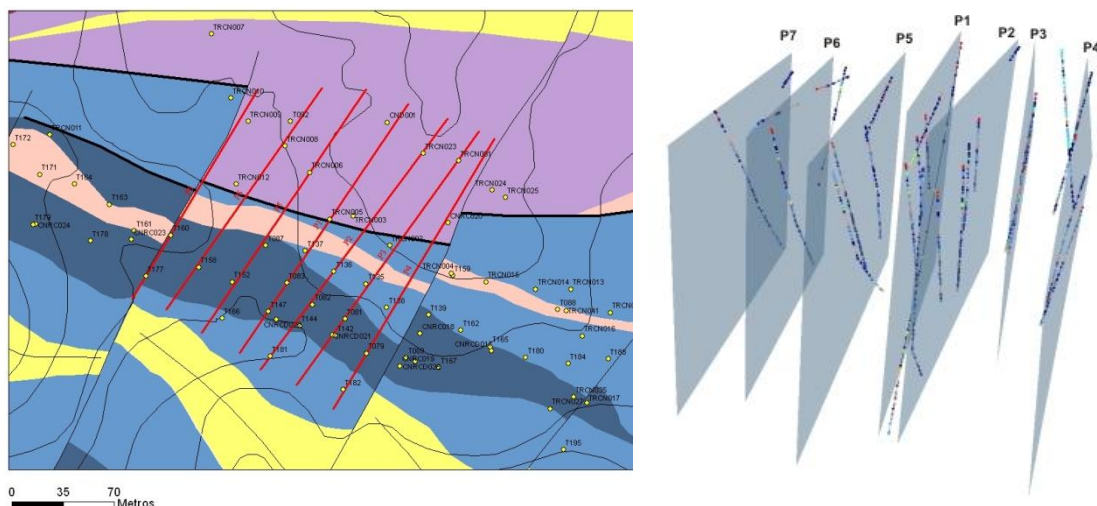


Figura 6.1 – Localização dos perfis seleccionados em planta e em profundidade.

Na Figura 6.2 representa-se o perfil definido como P1 e a informação na área de influência. Os restantes perfis encontram-se representados no Apêndice do Capítulo 6.

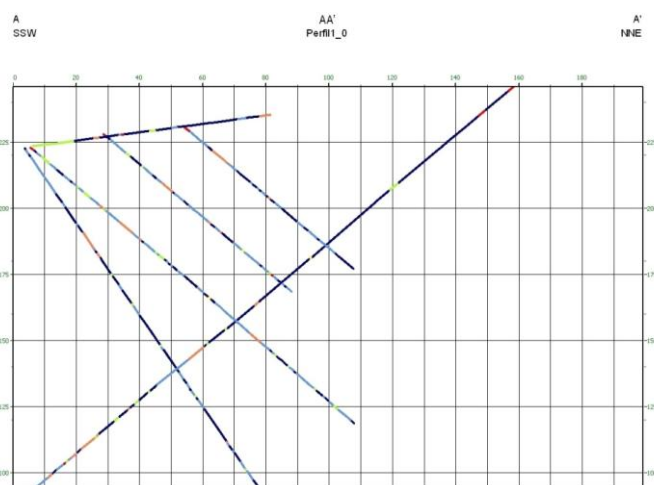


Figura 6.2 – Perfil 1 e sondagens na área de influência.

6.2. DESENHO DOS CORPOS GEOLÓGICOS NOS PERFIS

Tal como referido no Capítulo 5, com base nos resultados das fases heurística e estatística, realizadas durante o tratamento dos dados geológicos, foram seleccionados 3 litogrupos para a primeira etapa da modelação geológica (Tabela 5.4).

É importante referir, uma vez mais, o cariz interpretativo desta etapa do estudo. De modo geral, cada perfil foi desenhado com base na informação geológica contida nas sondagens e dados cartográficos de superfície (Chichorro, 2006), bibliografia e conhecimento geológico da região. Chichorro, 2006 estudou o sector alvo do presente trabalho e fez uma caracterização exaustiva das rochas que constituem os litogrupos a modelar, pelo que o desenho dos corpos geológicos correspondentes aos litogrupos é essencialmente baseado nos resultados do seu estudo.

A interpretação nos perfis iniciou-se pelo litogrupo 4. A sua idade geológica e o conhecimento da região sugerem que estes corpos não estão deformados. Os resultados cartográficos de Chichorro, 2006, relativos às rochas que constituem o litogrupo 4, e que contribuíram para a interpretação geológica e desenho do litogrupo 4 nos perfis, são as seguintes:

- i. O sector de Casas é atravessado por vários diques leucocráticos;
- ii. Não foram observados *fabric*s de deformação no estado sólido a afectar os corpos granitóides identificados no sector de Casas Novas;
- iii. O dique mais representativo foi cartografado. O seu comprimento é de aproximadamente 600m com espessura variável entre 1 e 10m. Apresenta direcção N75°W inclinando 40-60° para SSW. O dique corta o *fabric* milonítico fazendo, no plano horizontal, um ângulo de 35° no sentido anti-horário com a foliação milonítica. Aparentemente instala-se ao longo de cisalhamentos extensionais esquerdos que controlam, em grande medida, as translações de massa segundo esta direcção.
- iv. A atitude dos diques de granitóides de Casas Novas sugere a possibilidade dos fundidos ascenderem e cristalizarem ao longo das anisotropias relacionadas com os planos axiais das dobras subverticais;
- v. Assume-se que a orientação média dos diques é subparalela à do dique cartografado.

Seguidamente foi feita uma compilação de resultados cartográficos anteriores para o litogrupo 3, de que se destacam:

- i. Afloram em posição correspondente ao núcleo de um sinclinal;
- ii. O padrão geral do padrão de afloramento dos anfibolitos, em mapa, é de aproximadamente N50-60°W.

Reunidas todas as indicações com informação que contribuísse e justificasse as interpretações a realizar, procedeu-se ao desenho dos corpos geológicos correspondentes aos litogrupos 3 e 4. Tentou-se idealizar corpos geológicos concordantes com as informações recolhidas, e que correspondessem ao registado nas sondagens. Numa primeira fase os desenhos foram realizados manualmente, e só depois foram digitalizados no *software* gOcad.

Refere-se que apenas foram desenhados os corpos que apresentavam concordância com o conhecimento geológico da região. A opção de não modelar todos os troços dos litogrupos considerados foi tomada com base na subjectividade associada. Alguns troços apenas permitiam que a sua modelação fosse feita com base neles próprios, constituindo manchas isoladas dos restantes corpos. O elevado grau de subjectividade destas manchas comparado com a perda de informação associada à sua não modelação apresentou maior significância, pelo que foi considerado a não modelação de alguns troços dos litogrupos definidos. A título de exemplo na Figura 6.3 apresenta-se o perfil p1. Os restantes encontram-se no Apêndice do Capítulo 6.

Nota importante: A modelação foi feita apenas para os litogrupos 3 e 4, assumindo-se o 1 como encaixante. Assim, com a digitalização dos litogrupos 3 e 4 é conhecida a forma dos 3 litogrupos em todo o volume estudado.

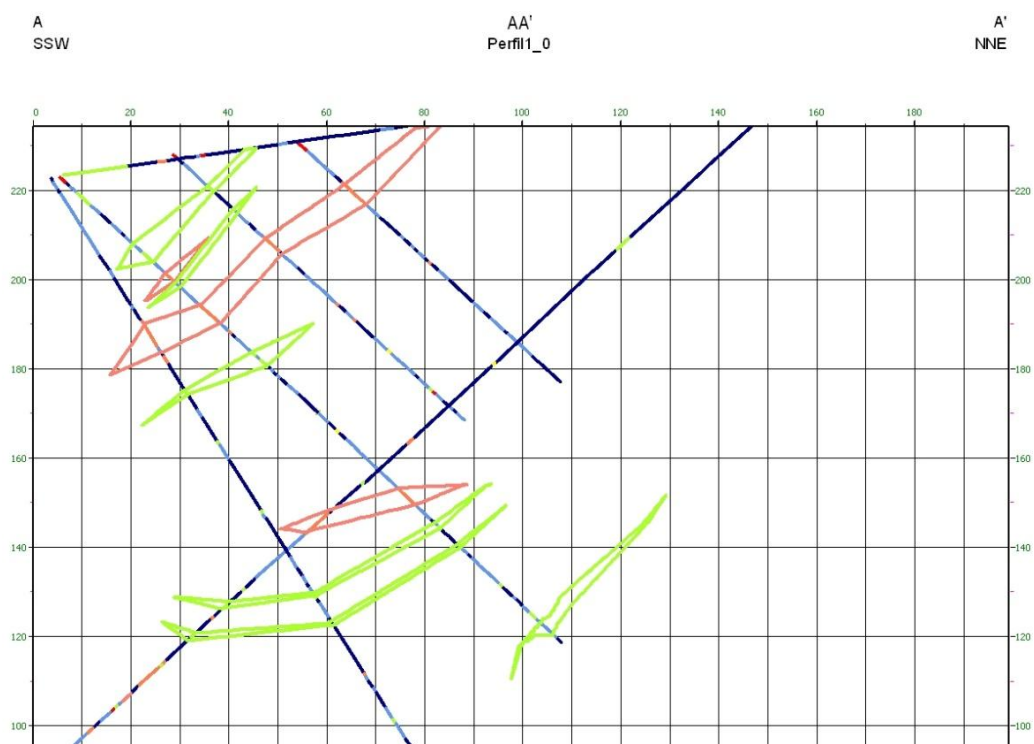


Figura 6.3 – Resultado da interpretação dos corpos geológicos (litogrupos 3 e 4) no perfil 1.

6.3. INTERPOLAÇÃO E FECHO DE SUPERFÍCIES

A construção tridimensional dos corpos geológicos foi efectuada pelo *software* gOcad de modo semi-automático após a digitalização dos contornos por interpolação linear. A referência a um modo semi-automático é apenas porque foram definidos manualmente, nós homólogos, para

cada par de contornos, previamente à interpolação. Em termos topológicos, cada corpo é modelado por uma superfície fechada (rede de triângulos em estrutura vectorial) correspondente à sua envolvente a ligar os contornos que foram digitalizados perfil a perfil.

Na Figura 6.4 e Figura 6.5 mostram-se os resultados da modelação para os corpos geológicos correspondentes aos litogrupos 4 e 3, respectivamente. Na Figura 6.6 mostra-se o resultado do conjunto enquadrado com o relevo à superfície.

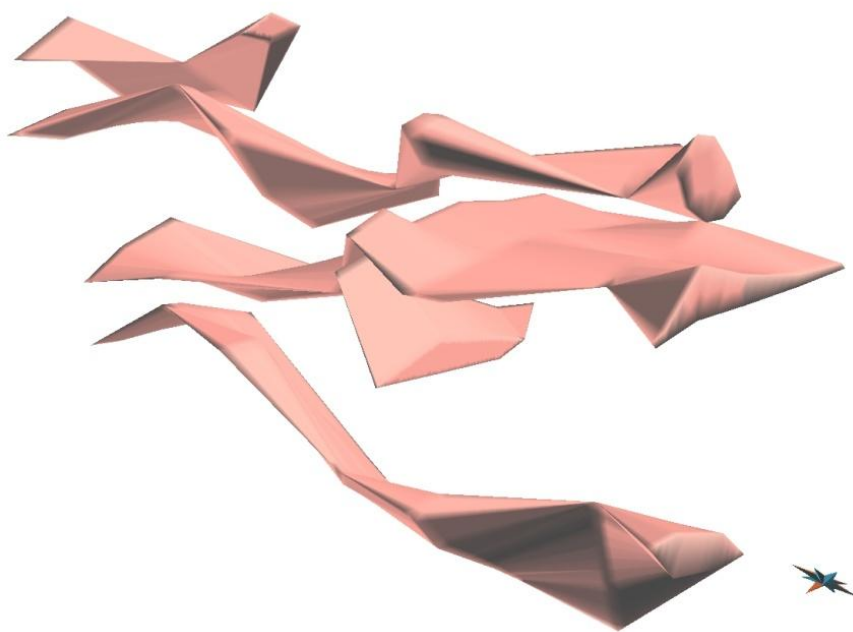


Figura 6.4 – Representação vectorial dos corpos geológicos correspondentes ao litogrupo 4 (rochas ígneas plutónicas hipabissais e subvulcânicas) As dimensões aproximadas de comprimento e altura, do conjunto dos corpos, são respectivamente 205 e 145m..

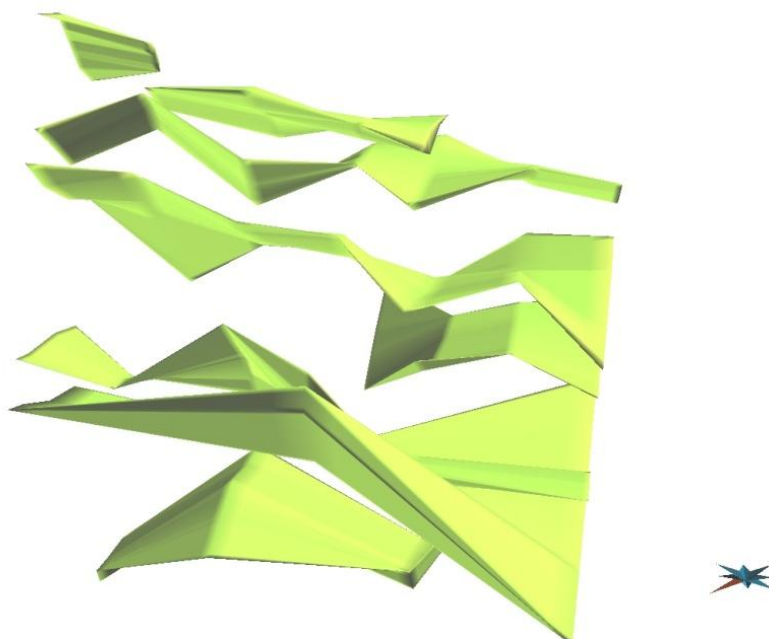


Figura 6.5 – Representação vectorial dos corpos geológicos correspondentes ao litogrupo 3 (rochas máficas). As dimensões aproximadas de comprimento e altura, do conjunto dos corpos, são respectivamente 205 e 145m.

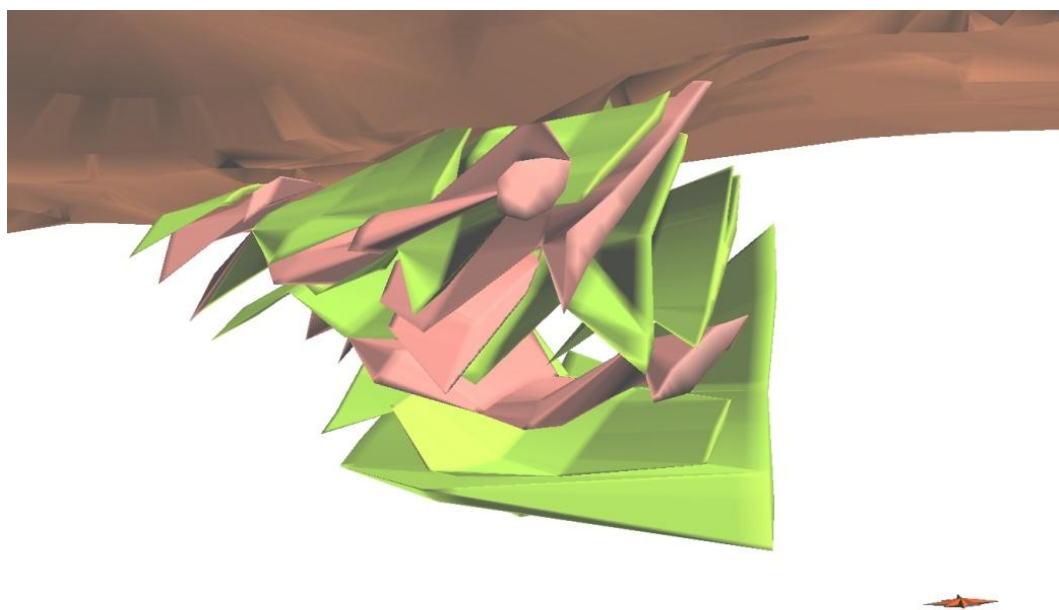


Figura 6.6 – Representação conjunta dos corpos geológicos correspondentes aos litogrupos 3 e 4 enquadrado com o relevo à superfície. A superfície a castanho simula a topografia. As dimensões da imagem, em termos de comprimento e altura são as mesmas do conjunto dos corpos geológicos do litogrupo 3.

A continuidade e atitude dos diques leucocráticos observada na Figura 6.6, já era esperada. A bibliografia, nomeadamente **Chichorro, 2006**, indica que os granitóides não se observam deformados⁶, e que a sua atitude sugere uma instalação ao longo de anisotropias tectónicas (cisalhamentos extensionais relacionados com a exumação do TAME?) Aliás, a modelação geológica foi iniciada por este litogrupo 4 precisamente devido a este conhecimento de base.

De certa forma a possibilidade de modelação tridimensional de vários corpos pertencentes ao litogrupo 3 foi algo inesperado. Muitos destes corpos foram interpretados por Chichorro, 2006, como sendo representativos de unidades tectónicas deformadas e estiradas, pertencentes ao Complexo Ígneo – Sedimentar do Carvalhal. A sua modelação 3D, juntamente com relações de campo e relações observadas nas sondagens, assim como o seu carácter petrográfico e geoquímico sugere que estes corpos, na realidade representem diques porfiríticos dacíticos e andesíticos, como já descritos por Moita, 2008, em contexto similar (Ribeira de Almansor-Montemor-o-Novo). Os diques leucocráticos e mesocráticos testemunham o carácter sincrónico entre a deformação transcurrente e o magmatismo carbonífero.

As modelações efectuadas à maioria destes corpos resultaram numa significativa continuidade, e num sub-paralelismo morfológico e espacial relativamente aos diques leucocráticos do litogrupo 4, podendo sugerir uma origem genética e temporal entre eles.

De facto, demonstra-se que a conjugação de dados cartográficos geológicos e geoquímicos com ferramentas de modelação 3D, nomeadamente o gOcad, podem contribuir para a elucidação do carácter estratigráfico e ajudar a estabelecer relações de ordem temporal e genética. Demonstra-se desta forma que a modelação 3D pode ser aplicada em regiões que manifestam elevados gradientes de deformação heterogénea e progressiva.

6.4. CONVERSÃO PARA ESTRUTURA MATRICIAL

Para a utilização da informação 3D dos litogrupos na modelação dos teores de ouro, é necessária a transformação das superfícies envolventes para volumes (no gOcad designa-se por *3D volume*) e posteriormente para estrutura matricial (*sgrid* no gOcad). A primeira transformação é meramente topológica, resultando em volumes diferenciados entre si pela propriedade litogrupo com os códigos 1, 3 ou 4.

Para utilizar a informação dos litogrupos como proporções locais a impor no modelo de simulação geoestatística, e porque a SSI é baseada no preenchimento de uma estrutura matricial,

⁶ Os diques leucocráticos não testemunham deformação dúctil no estado sólido, podendo, no entanto, ser afectados por cisalhamentos frágeis discretos ou por falhas.

é necessário nesta fase converter os corpos geológicos da estrutura vectorial para uma estrutura matricial. No gOcad iniciou-se um modelo matricial deformável do tipo *s-grid*⁷, com células unitárias de 1m, sendo constituído por 7.285.000 células, 235 ao longo do eixo x, 200 no eixo y e 155 no eixo z. Esta *s-grid* foi erodida à superfície pelo relevo mas não foi deformada (Figura 6.7). Posteriormente classificaram-se as células com os códigos 1, 3 e 4 de acordo com a propriedade geológica do corpo que intersecta (Figura 6.8).

Na transformação de vectorial em matricial observou-se que existiam alguns poucos casos de intersecção dos volumes. Embora não exista sobreposição nos perfis, com a geração das superfícies a 3D entre perfis nada indica que não possam acontecer intersecções entre os volumes. Assim, para obviar este potencial problema houve que definir uma regra de prioridade entre os litogrupos 3 e 4. Esta situação poderá ser minimizada em futuros trabalhos com a inclusão de mais perfis.

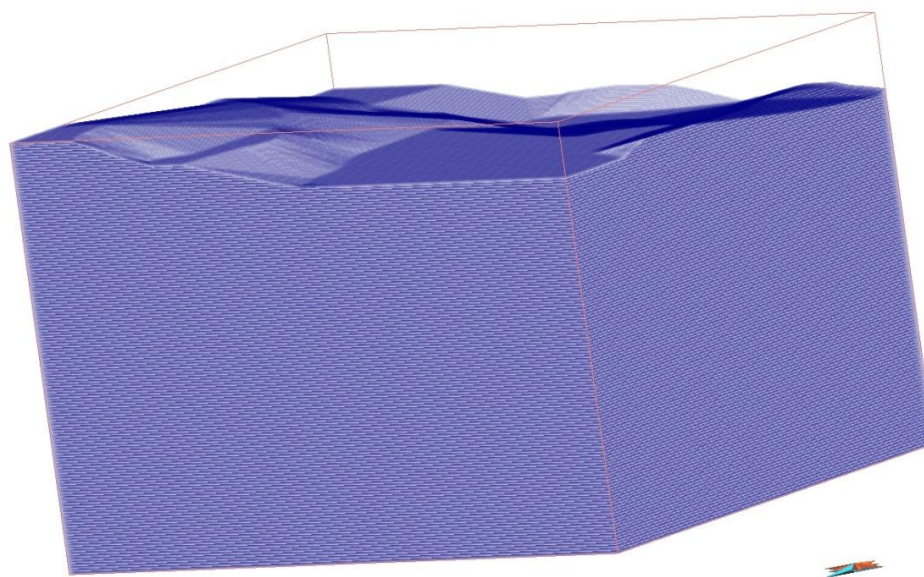


Figura 6.7 – Representação das 7.285.000 células com 1m de dimensão em que se discretizou a área em estudo.

⁷ Um modelo matricial simples, de acordo com o *software* gOcad denomina-se de voxel: matriz regular 3D, construída a partir de elementos volumétricos, *voxels* ou células, cujas propriedades do objecto ficam definidas no centro de cada célula. Uma *s-grid* é igualmente um modelo matricial, mas que pode ser deformado. As propriedades numa *s-grid* podem ficar definidas no centro ou nos cantos das células.

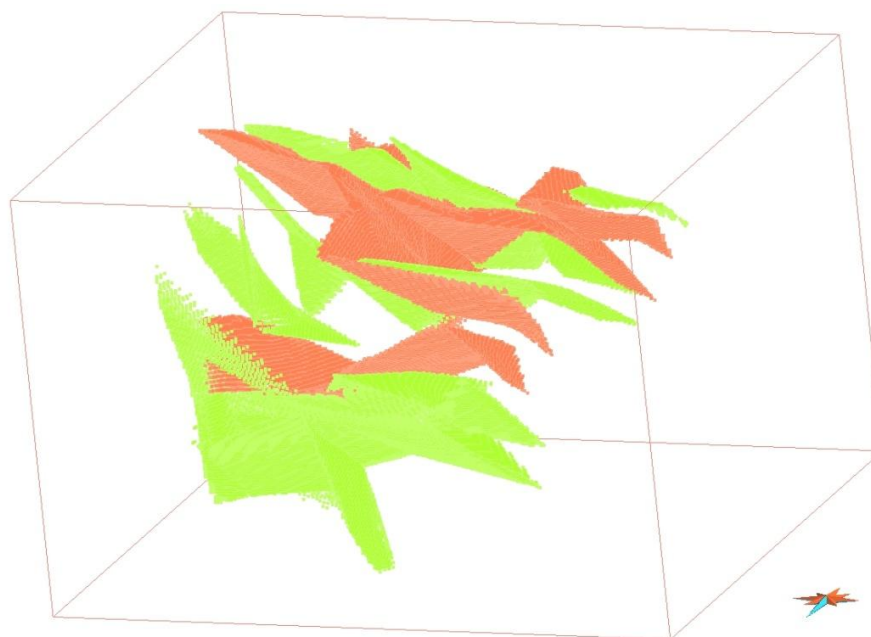


Figura 6.8 – Modelo dos litogrupos 3 e 4 transformado para o modo de representação matricial.

Chichorro, 2006 analisou o contacto entre as litologias que constituem os litogrupos criados, e concluiu que os contactos entre eles são frequentemente difusos e localmente bruscos. Para o autor, tal sugere a imiscibilidade num estado submagmático, o que consequentemente pode indicar a contemporaneidade dos líquidos ou um ligeiro desfazamento no tempo. Ainda assim, é sua opinião que as rochas leucogranitóides (litogrupo 4) sejam posteriores às rochas mesocráticas (litogrupo 3), pelo que, em casos de intersecções, o litogrupo 4 é o que prevalece, uma vez que se assume que a sua ocorrência é posterior à do litogrupo 3.

6.5. REAVALIAÇÃO DA CORRELAÇÃO DOS LITOGRUPOS COM OS TEORES DE OURO

Tal como já foi referido, interessa avaliar e quantificar a correlação da geologia / litogrupos com os teores de ouro. Esta correlação já foi efectuada anteriormente (Capítulo 5) mas com a totalidade dos dados das sondagens/sanjas. Essa análise permitiu observar a existência de discriminação, por parte dos litogrupos, relativamente às classes auríferas para a área total da mineralização. Com esta reavaliação pretende-se quantificar esta correlação para uma área mais restrita como a que foi efectivamente estudada. O procedimento realizado é o mesmo tendo-se obtido as proporções conforme a Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Proporção das classes dos teores de ouro por litogrupo na área da modelação e na área total.

Litogrupo	Classe Au (área total)			Classes Au (área de modelação)		
	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
1	0,737	0,219	0,044	0,670	0,260	0,070
3	0,534	0,408	0,058	0,587	0,364	0,049
4	0,880	0,105	0,016	0,800	0,156	0,044

As diferenças mais significativas verificam-se na classe alto dos teores de ouro, principalmente porque esta é a classe menos frequentada, pelo que qualquer variação será mais sentida ao nível dos valores respectivos. De qualquer forma os valores mantêm a mesma ordem de grandeza, validando a utilização dos litogrupos como informação secundária discriminante. Com esta etapa permite-se a quantificação da informação secundária condicionante a introduzir no modelo geostatístico.

7. SIMULAÇÃO DOS TEORES DE OURO

7.1. ANÁLISE ESPACIAL

Na modelação geoestatística, a análise do comportamento espacial de uma dada variável é normalmente feita com a ferramenta clássica variograma experimental seguida do ajustamento por uma função teórica. Esse processo inicia-se com a pesquisa das direcções principais, isto é, direcções ao longo das quais se espera encontrar a maior continuidade da variável em estudo. Os resultados desta fase são muito influentes no resultado final, quer seja feita estimação ou simulação, pelo que deve ser executada com particular minúcia na procura em todas as direcções potenciais. Comparativamente a um estudo a 2D, em 3D o número de direcções potenciais para pesquisa é normalmente muito elevado sendo necessário combinar vários pares de azimute e inclinação.

No contexto da análise espacial podem ser calculados variogramas omnidireccionais (calculado para todos os pares de pontos independentemente da direcção), ao longo de um plano (só com os pares de pontos posicionados no plano – variograma planar) ou de uma direcção (só com os pares de pontos posicionados nessa direcção – variograma unidireccional).

Um variograma planar fornece informação sobre o número de estruturas e a distância máxima de correlação nesse mesmo plano mas não mostra se existem anisotropias, isto é, correlações espaciais variáveis segundo a direcção. Já a pesquisa do variograma ao longo de uma direcção específica (linha de teste) implica a análise subsequente de linhas perpendiculares com vista a legitimar uma eventual anisotropia e definir um elipsóide de amplitudes.

Existem vários factores geológicos que fazem apontar determinadas direcções ou planos como os mais indicados para a pesquisa da análise espacial. Quando a informação aponta para determinada anisotropia geológica de um corpo ou estrutura, por exemplo, o rumo da foliação, a busca deve, numa primeira fase, atestar a existência ou não de uma relação espacial com essa anisotropia planar.

Tendo como base esse pressuposto, procedeu-se a uma pesquisa intensiva da direcção principal segundo uma metodologia de *tentativa e erro*. Foram analisadas direcções e planos cujo significado geológico se revelou preponderante numa possível relação com os teores auríferos. Assim, foram pré-seleccionados os 4 seguintes planos/direcções:

- i. **N30°E 45°NE** – Direcção e inclinação de cerca de 70% das sondagens realizadas na área em estudo;
- ii. **N30°W 75°SW** – Atitude média da foliação milonítica que afecta a área de Casas Novas. **Chichorro, 2006** assume-a como a direcção média da foliação, e sugere que se verifica

alguma relação espacial entre este *fabric* e as estruturas mineralizadas (veios e vénulas de quartzo). Esta direcção deve ser analisada com alguma tolerância, uma vez que se verificam variações locais na direcção principal da foliação milonítica, a qual pode variar até N75°W 85°SSW. A rotação deste *fabric* também ocorre por influência de: i) dobras mesoscópicas com os eixos paralelos ao estiramento mineral, ii) dobras tardias ou “kinks”, iii) falhas tardias que, com muita frequência, deflectem a foliação para direcções norteadas.

- iii. **10° S30°SE** – Sobre o *fabric* S-L ultramilonítico desenvolve-se uma lineação de estiramento mineral horizontal, que varia entre o horizontal e a inclinação de 10°-20° para SE.
- iv. **N65°W 75°SW** – Direcção média dos corpos filonianos leucograníticos. Procura-se com este teste avaliar a existência de uma possível relação espacial entre a localização das estruturas mineralizadas e os diques e segregações de leucogranitos.

A análise espacial deve ser realizada em três etapas: i) análise do plano correspondente à atitude média do *fabric* ou anisotropia estrutural, planos médios de corpos geológicos ou planos de sondagens; ii) análise ao longo de eventuais linhas de teste contidas nesses planos (exemplo: estiramento mineral); iii) análise de busca por varrimento do espaço no máximo de direcções possíveis (linhas de teste).

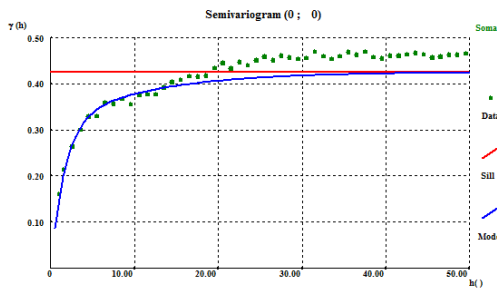
7.1.1. CÁLCULO DE VARIOGRAMAS MULTIFÁSICOS E AJUSTAMENTO DE MODELOS TEÓRICOS

Todos os estudos de variografia foram executados com o *software Geostatistical Modeling Software* (geoMS). As especificações deste programa fazem com que para calcular variogramas planares sobre planos não horizontais tenha sido necessário proceder à rotação das coordenadas originais de modo a georeferencial horizontalmente estes planos.

Todos os variogramas calculados são do tipo multifásico para as 3 classes de ouro (alto, médio e baixo).

Foram então calculados os variogramas multifásicos nas direcções/planos referenciados pela rede de sondagens e pelo padrão geológico cartográfico que se listam nas figuras seguintes 7.1 a 7.3.

$$\text{Exp}_1(C=0,266, a=5\text{m}) + \text{Exp}_2(C=0,159, a=33\text{m})$$



$$\text{Sph}_1(C=0,28, a=4\text{m}) + \text{Sph}_2(C=0,145, a=23\text{m})$$

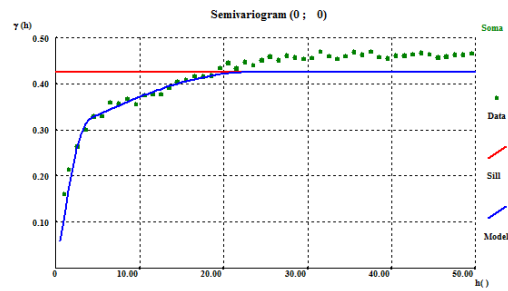
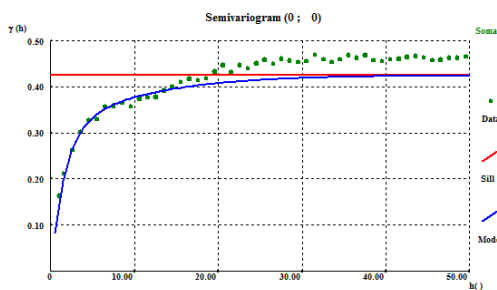


Figura 7.1 – Variograma experimental na direcção N30°E, 45°NE e ajustamento com modelo exponencial e esférico.

$$\text{Exp}_1(C=0,266, a=5\text{m}) + \text{Exp}_2(C=0,159, a=30\text{m})$$



$$\text{Sph}_1(C=0,28, a=4\text{m}) + \text{Sph}_2(C=0,145, a=23\text{m})$$

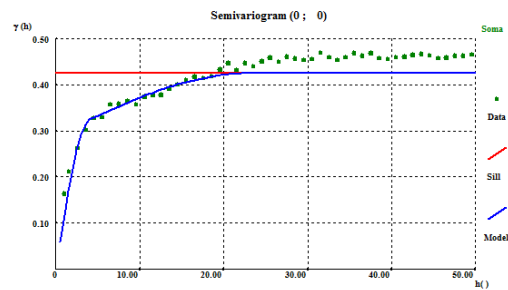
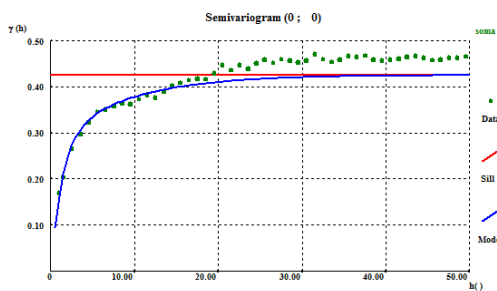


Figura 7.2 – Variograma experimental no plano N30°W, 75°SW (atitude média da foliação milonítica que afecta a área de Casas Novas).

$$\text{Exp}_1(C=0,266, a=4\text{m}) + \text{Exp}_2(C=0,159, a=26\text{m})$$



$$\text{Sph}_1(C=0,28, a=4\text{m}) + \text{Sph}_2(C=0,145, a=22\text{m})$$

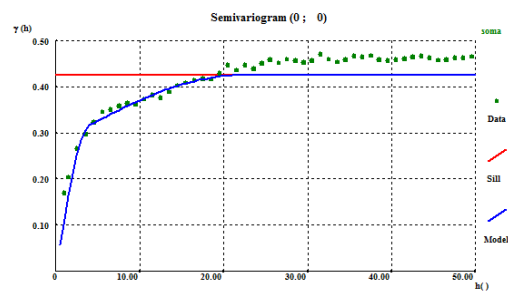


Figura 7.3 – Variograma experimental na direcção N65°W, 75°SW (Atitude dos corpos filonianos leucograníticos).

Em todos os variogramas planares são observáveis duas estruturas, tendo sido testados com sucesso ajustamentos com modelos teóricos de tipo exponencial e esférico. A primeira estrutura

é de baixa amplitude (cerca de 4-5 m), e a segunda é de amplitude muito maior (20-30m). As amplitudes consideradas para estas direcções são sensivelmente constantes.

Aqui é importante salientar que a disposição dos dados (sondagens e sanjas) não ocorre segundo uma malha espacial regular mas também não é completamente aleatória, ou seja, existem muitas direcções para as quais não existem pares de pontos e por isso não é possível calcular variogramas. Esta é aliás uma característica dos dados associados a uma rede de sondagens de prospecção, dispendo-se segundo determinados alinhamentos em detrimento de outros. Este facto obriga a uma cuidadosa leitura dos resultados dos variogramas.

Relativamente aos variogramas experimentais em todos os planos analisados, verifica-se uma correlação espacial inquestionável, e consistência nas amplitudes, pelo que se coloca a hipótese de possível isotropia. No entanto, a distância dos dados no plano das secções das sondagens não é equiparável com as distâncias sub-perpendicularmente a esta. Naturalmente, o mesmo acontece quando analisamos segundo a linha de teste referente à atitude média das sondagens ou segundo linhas de teste sub-perpendiculares às secções das sondagens. Nestes casos, é necessário a analisar os variogramas fazendo variar o passo até a uma distância mínima representativa dos dados. Mesmo levando em conta esta imposição, os resultados não são consistentes com a existência de anisotropias com amplitudes superiores a 20-30 m. Efectivamente, os dados apontam para uma isotropia dos teores de Au (zonas mineralizadas) eventualmente condicionada pela escala de amostragem, a qual, tudo aponta, não capta a escala das estruturas mineralizadas. No entanto, a análise dos dados discrimina um aspecto extremamente importante e de certa forma imprevisível face a algumas evidências de campo. Com efeito, o estudo mostra que, em Casas Novas, as estruturas mineralizadas (veios/vénulas e encaixante mineralizados) são em termos dimensionais de volume reduzido e distribuem-se no espaço de uma forma descontínua, podendo inclusivamente a sua distribuição não estar condicionada apenas por uma direcção preferencial, mas sim por várias direcções no espaço.

Ainda assim, alguns aspectos do enquadramento geológico das mineralizações de Casas Novas apontam para a possibilidade de uma anisotropia desenhada pelos corpos mineralizados, embora, como adiante se demonstrará, também existem testemunhos que contrariam essa eventualidade e que por conseguinte, simulam um modelo mais próximo da isotropia.

O cruzamento de dados geológicos e cartográficos obtidos por **Faria (1988)**, **Carvalhosa & Zbyszewski (1994)**, **Ribeiro, (1994)**, **Faria et al. (1997a, b)**, **Chichorro & Young (1997)**, **Chichorro, (2006)**, sugere a existência de um alinhamento preferencial das estruturas mineralizadas a várias escalas, em simultâneo com a existência de uma série de factores tectónicos, que vão interferir com essa continuidade espacial. Estes dados podem ser sintetizados da seguinte forma:

- À escala 1:2500 observa-se claramente uma orientação preferencial da anomalia geoquímica de Au no solo ($> 50\text{ppb}$) a qual se estende por cerca de 800 m ao longo da direcção N60°W. A leitura das sanjas realizadas sugere igualmente uma possível correlação lateral das zonas mineralizadas, que todavia não ultrapassa os 25-30 m.
- Evidências de campo à meso e microescala e os levantamentos geológicos das sanjas sugerem a possibilidade de alguns veios mineralizados se apresentarem subparalelamente à foliação milonítica. Com efeito, alguns aspectos da deformação à escala mesoscópica, visíveis ao longo da Ribeira de São Brissos, descritos e representados em plano próximo da horizontal em **Chichorro, 2006**, mostram a existência de segregações quartzosas, por vezes mineralizadas, geralmente concordantes com a foliação milonítica. No entanto, **Chichorro, 2006**, mostra que as mesmas estruturas podem aparecer como dobras intrafoliares geradas pela deformação progressiva. O mesmo aspecto de veios concordantes e discordantes em relação ao *fabric* principal é passível de ser testemunhado nas carotes das sondagens (Figura 7.4), as quais põe claramente em evidência um paralelismo entre alguns veios mineralizadas e a foliação, e a existência de vénulas quartzosas com dobras intrafoliares.



Figura 7.4 – Amostras de mão de um gnaiss quartzo-feldspático e biotítico.

Com base nestes pressupostos, decidiu-se introduzir uma nova etapa no processo da análise espacial, a fim de detectar a existência das referidas anisotropias. Para esse propósito, foram individualizadas as sondagens que constituem cada um dos perfis realizados na modelação dos litogrupos (Capítulo 5), e analisados, a título individual, cada um dos perfis, para compreender a sua variação espacial. Para esta análise foram calculados variogramas planares. Os dados (sondagens de cada perfil) foram transformados em 2D, ficando dispostos num plano YoZ.

Para cada perfil foram analisadas as linhas de teste representativas das atitudes e orientações sugeridas como significativas, pela bibliografia, e as respectivas perpendiculares. Os resultados

obtidos revelam, de facto, alguma variação na amplitude, em determinadas direcções, e que a mesma varia de perfil para perfil.

No entanto, é de extrema importância referir que a análise de cada perfil foi realizada com as sondagens que o constituem, sendo que, no máximo, são captadas cinco sondagens por perfil, e inclusive, alguns são constituídos por apenas três. A análise espacial não produz resultados consistentes quando a representatividade da amostra (número de pontos) é reduzida e por esta razão, eventuais isotropias/anisotropias encontradas nos variogramas devem ser interpretadas à luz desta limitação, constituindo por isso meras hipóteses que devem ser avaliadas e confirmadas através de outros tipos de análise geológica e geoestatística. A título de ilustração, na Figura 7.5 apresenta-se um diagrama com a representação dos resultados obtidos na análise espacial do perfil 1.

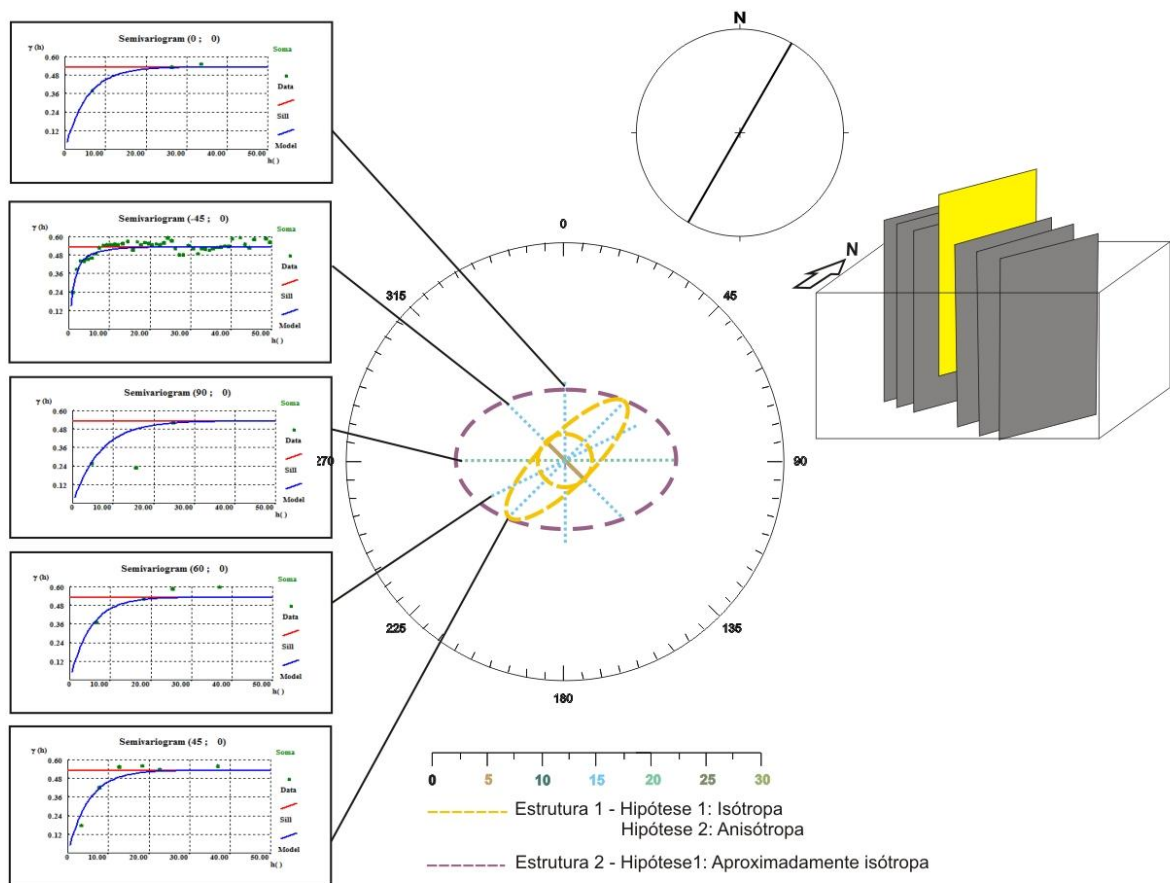


Figura 7.5 – Esquemática dos resultados obtidos na análise espacial do perfil 1.

Como se pode constatar na Figura 7.5, são constituídos dois cenários para a modelação da primeira estrutura. A ausência de dados na direcção perpendicular à qual esta é detectada, ou

seja, a perpendicular a N45°W, permite assumir dois cenários possíveis. Dada a escala desta estrutura (4-5m), a sua identificação só é possível quando se analisam direcções no espaço, nas quais é possível encontrar pares de pontos espaçados com distâncias iguais ou inferiores a essas dimensões. Ora, tal só acontece quando, quer na análise planar dos perfis, quer na análise tridimensional de todo o volume em estudo, se decide estudar a linha de teste das sondagens (45° N30°E) ou realizar uma avaliação omnidireccional, uma vez que são aquelas que resultam em variogramas com mais pares de pontos, e consequentemente detectam ambas as estruturas. Uma vez que mais nenhuma outra direcção detectou a primeira estrutura, e se obtém a mesma ordem de grandeza para a sua amplitude, no estudo da linha de teste das sondagens ou do plano omnidireccional, o valor que prevalece é o médio, sendo este ditado pelo omnidireccional (o resultado revela a média de todas as direcções do espaço). Este pressuposto justifica a hipótese referenciada na figura como número 1, ou seja, suporta o modelo isotrópico.

A problemática da estrutura 2 centra-se na ausência de pontos na maioria dos variogramas, o que impossibilita a obtenção de resultados fiáveis. Como tal, o pressuposto aplicado à estrutura 1 é também passível de ser empregue na análise da estrutura 2. Uma vez que nenhum variograma, à excepção daqueles que resultam em maior número de pares de pontos, permite retirar qualquer conclusão, a escolha do tipo de modelo da estrutura (se isotrópica ou anisotrópica), deve basear-se no resultado obtido pela análise da média dos dados. Assim, verifica-se novamente a existência de duas opções, uma anisotrópica, baseada na interpretação do local das mineralizações de Casas Novas e ausência de informação nas direcções perpendiculares, e outra isotrópica, revelada pela média dos dados, isto é, análise omnidireccional do plano em estudo.

Os resultados obtidos, para os restantes perfis, foram semelhantes. Os pares de pontos dos variogramas, são, igualmente, insuficientes para atestar alguma afirmação de anisotropia e os princípios usados para a constituição das hipóteses no perfil 1, foram também aplicados aos restantes perfis.

No entanto, a análise individual de cada perfil evidenciou alguma consistência nas linhas de testes representativas das atitudes referidas na bibliografia. Dado este resultado, foi realizada uma análise a essas mesmas linhas de teste, e respectivas perpendiculares, em todo o volume em estudo. Nesta análise foram tidas em consideração a distância entre sondagens, sendo por isso utilizado um passo diferente consoante as direcções em estudo. O passo variou entre 1m e 20m, tendo sido ajustados consoante a obtenção de maior ou menor número de pares de pontos. Obtiveram-se os seguintes variogramas (Figuras 7.6 a 7.10):

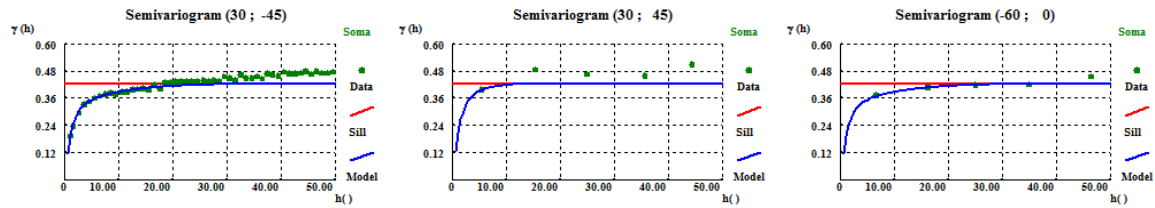


Figura 7.6 – Linha de teste das sondagens (45°N30°E) e respectivas linhas perpendiculares

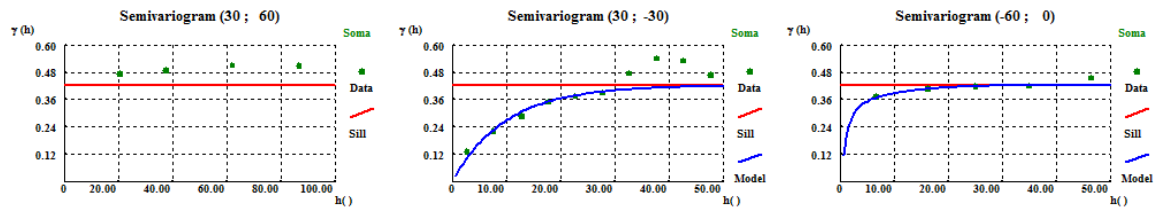


Figura 7.7 – Linha de teste 60°S30°W e respectivas linhas perpendiculares

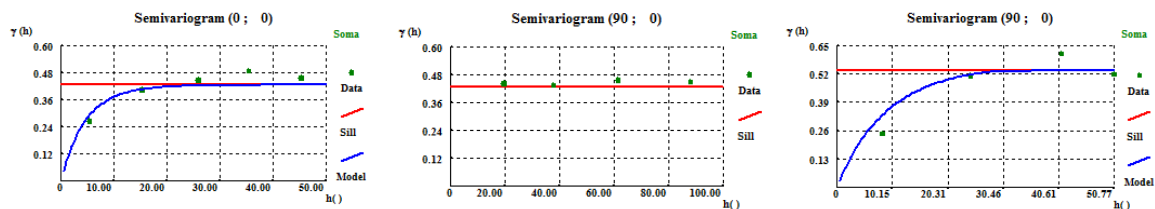


Figura 7.8 – Linha de teste horizontal e respectivas linhas perpendiculares

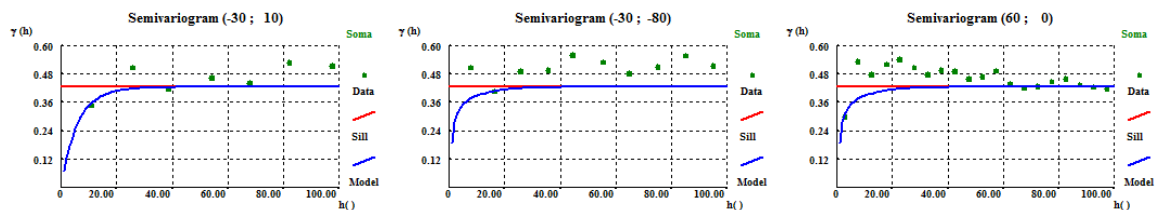


Figura 7.9 – Linha de teste 10° S30°SE e respectivas linhas perpendiculares

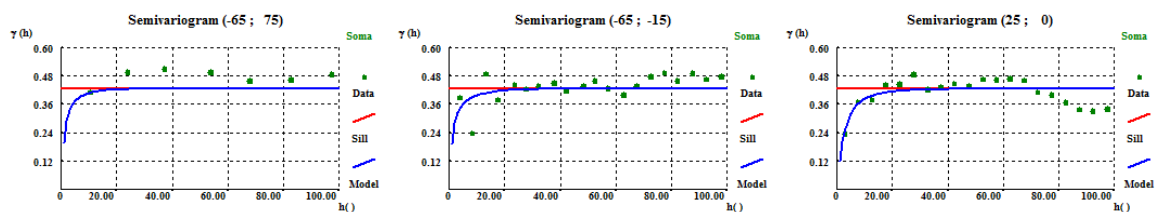


Figura 7.10 – Linha de teste 75° N65°W e respectivas linhas perpendiculares

A interpretação dos variogramas realizados baseou-se no mesmo princípio utilizado na análise de cada perfil. A maioria dos variogramas obtidos não apresenta pontos suficientes para se realizar um ajuste correcto, de uma função teórica, e conseqüentemente a informação a retirar é inconclusiva. No entanto, refere-se os resultados obtidos na Figura 7.6 referente à linha de teste

das sondagens. Para a primeira estrutura foi obtida uma amplitude de 3,5m e para a estrutura dois, o mesmo parâmetro é 25m.

Foi então realizada uma análise sistemática em todas as direcções do espaço definidas segundo linhas de teste, variando a inclinação em 15° ao longo de direcções pré-definidas e variáveis de 20 em 20°, para que se analisasse todo o volume em estudo. Desta análise resultaram 55 variogramas. Para cada um, foi analisado o número de pares de pontos obtidos, e seleccionados os que apresentavam maior representatividade. É importante referir que, uma vez que se efectuou uma análise sistemática, não foi realizada um ajuste do passo de modo particular, isto é, não foram realizadas alterações no passo em nenhum variograma. Foi utilizado o passo de 1m devido à dimensão do suporte dos dados geoquímicos e com o objectivo de se criarem condições para a possível identificação de ambas as estruturas. Relembre-se que, no caso de o passo ser superior a 5m, a detecção da primeira estrutura já não é possível, por questões de escala.

Da totalidade dos variogramas criados, apenas quatro direcções se mostraram relevantes, isto é, apenas quatro variogramas apresentam pares de pontos suficientemente representativos, que podem fornecer resultados mais fiáveis. Os variogramas obtidos foram os referentes às seguintes linhas de teste, medidas no plano dos perfis (nota: atitudes não referenciadas em relação ao Norte, mas somente para fins de orientação no plano e *input* no software): 45°, N20°E; 45°, N40°E; 60°, N20°E; e 60°, N40°E. Supõe-se que estas direcções espaciais estejam condicionadas pelos dados amostrais de origem, isto é, pela direcção e inclinação média das sondagens, dado os 15° de tolerância aplicada na realização dos variogramas. É apresentado apenas, aquele que, entre os referidos variogramas, apresentou maior número de par de pontos.

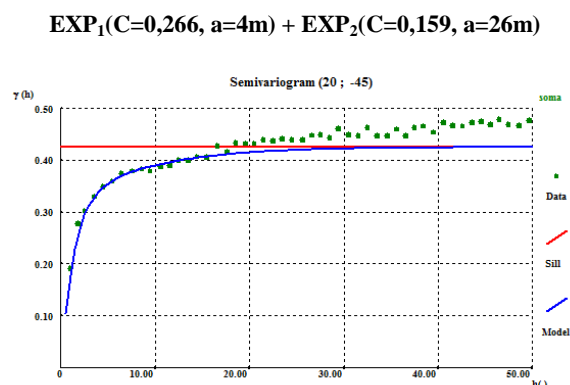


Figura 7.11 – Variograma experimental na direcção 45°, N20°E (direcção com maior número de par de pontos, obtida na análise espacial sistemática).

O ajuste do modelo teórico exponencial revela amplitudes inferiores às obtidas na Figura 7.6. Tal pode ser justificado pela diferença entre as direcções estudadas. Uma vez que a linha de teste 45°, N20°E apresenta um desvio de 10° da direcção média das sondagens, a sua representatividade pode não ser tão expressiva como a direcção 45°, N30°E, e consequentemente as amplitudes obtidas poderão ser inferiores. Ora, uma vez que direcção 45° N20°E é entre as seleccionadas, aquela que apresenta maior representatividade, todas as outras irão apresentar maior dificuldade no ajuste dos modelos teóricos, e consequentemente irão fornecer resultados menos robustos e mais inconclusivos.

Verifica-se que, entre todas as análises realizadas, os variogramas obtidos não apresentam comportamentos que permitam atestar diferentes amplitudes, não se conseguindo por isso justificar uma possível anisotropia.

Decidiu-se então realizar um variograma omnidireccional, a fim de se analisar a magnitude das amplitudes obtidas para ambas as estruturas. Os dados não foram rodados, sendo o plano em análise, o original da malha de prospecção. O passo utilizado foi mais uma vez o de 1m, pelas mesmas razões referidas anteriormente. Obtiveram-se os seguintes variogramas:

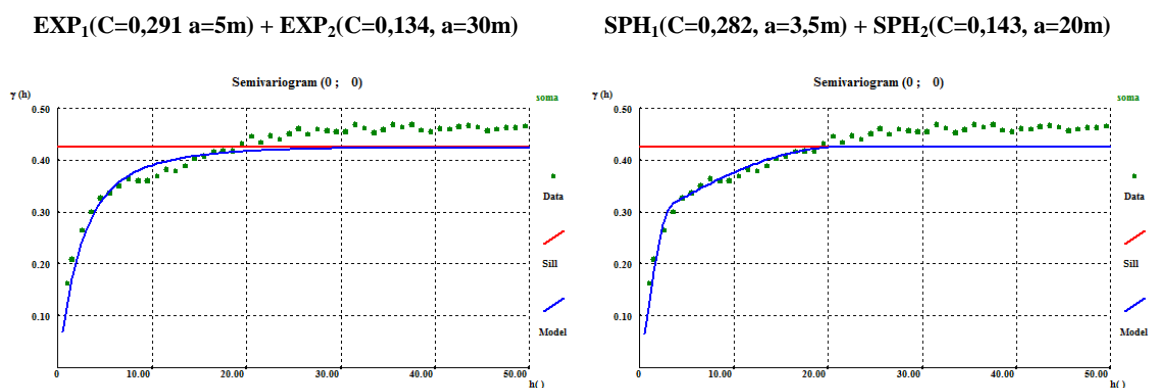


Figura 7.12 – Variograma omnidireccional (plano horizontal) (Variograma médio de todos os variogramas possíveis)

Primariamente há que registar que o variograma omnidireccional detecta ambas as estruturas, sendo possível realizar um ajuste teórico consistente. As amplitudes obtidas não diferem significativamente das obtidas anteriormente, embora sejam ligeiramente superiores. Ora, esta evidência, vai de encontro ao referido anteriormente. As dimensões da primeira estrutura só permitem a sua detecção quando o passo utilizado é inferior a 5m. Quando se ultrapassa esse valor, essa mesma estrutura deixa de ser visível, pelo que as amplitudes obtidas não são totalmente correctas, uma vez que são influenciadas por essa ausência.

Em suma, são essencialmente dois os factores de índole geoestatística que, no presente trabalho, influenciam a avaliação espacial do jazigo em estudo: i) ausência de variogramas consistentes – a ausência de pontos que permitam um ajuste correcto de um modelo teórico, impossibilita a obtenção de resultados robustos e conclusivos, ii) existência de duas estruturas – quando a primeira estrutura não é detectada no variograma, as amplitudes obtidas são sempre afectadas por essa ausência. Entenda-se que estas duas condicionantes derivam de uma malha original, que não é regular nem aleatória, o que conseqüentemente provoca uma diferença significativa no número de pares de pontos nas diferentes linhas de teste.

Dado que não foi possível identificar uma anisotropia para os teores de ouro segundo as classes definidas, teve de se assumir que, do ponto de vista da análise espacial multifásica, **o modelo em estudo é isótropo**.

Nestas condições, o variograma a utilizar na simulação deve corresponder ao variograma médio de todas as direcções possíveis, como seja o variograma omnidireccional do plano horizontal como está ilustrado na Figura 7.12. Na SSI serão considerados os dois ajustamentos, modelo exponencial e esférico, de forma a comparar os resultados.

7.1.2. JUSTIFICAÇÃO GEOLÓGICA PARA A EXISTÊNCIA DE UM MODELO ISÓTROPO

Os dados disponíveis apontam para uma distribuição espacial das três classes de ouro segundo um modelo isótropo. Isto significa que os variogramas não capturaram nenhuma anisotropia robusta, independente do plano e da linha de teste escolhida. Porém, e tal como já foi sublinhado, a interpretação dos resultados da análise espacial multifásica deve levar em linha de conta as condicionantes da malha de amostragem, na medida que esta não é aleatória nem regular. Não significa isto que se deva ignorar a hipótese de existência de uma anisotropia, na medida que, se existir de facto, só terá sido captada na análise específica de cada um dos perfis de sondagens. No entanto, a exiguidade de pontos retira robustez estatística a essa possibilidade, sugerida pelo carácter anisótropo da tectónica dúctil e pela análise da distribuição das zonas de elevados teores, vistas em secção, a qual sugere, de imediato, uma tendência para uma orientação média preferencial das zonas com teores > 1ppm - classe três, sendo essa sugestão mais robusta quando consideradas as classes 2 e 3 em simultâneo.

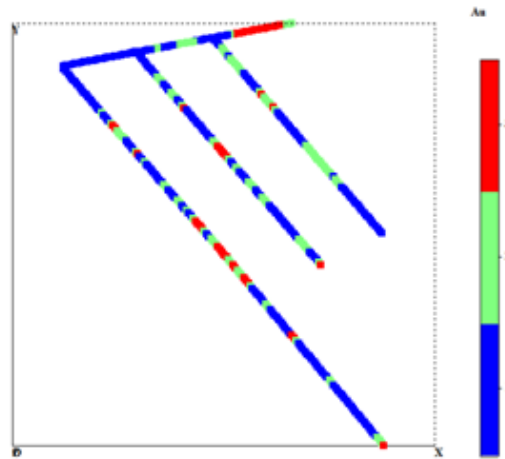


Figura 7.13 – Perfil 1 no plano YoZ, com a representação das classes auríferas correspondentes.

No entanto, e face aos resultados obtidos na variografia, a existência de uma anisotropia não é, de todo, justificada do ponto de vista estatístico e este facto aplica-se a ambas as estruturas captadas (estrutura 1 e 2). Apesar das condicionantes da análise, já mencionadas, esta evidência reveste-se de importante significado do ponto de vista geológico e de prospecção/exploração do jazigo. Basicamente, sugere uma limitação na continuidade espacial nas três direcções do espaço, com reflexo a todas as escalas, dos corpos ou zonas mineralizadas. Este carácter fortemente descontínuo dos corpos mineralizados pode ser justificado pelo próprio enquadramento geológico do sector em estudo, tal como foi descrito por **Chichorro, 2006** e **Pereira et al. 2007**.

As mineralizações de Casas Novas estão inseridas num ambiente muito dinâmico e complexo, correspondente à Zona de Falha da Boa-Fé (**Pereira et al. 2003**), que corresponde a uma faixa onde se observa elevados gradientes de deformação transcurrente, expressa num conjunto de tectonitos onde impera uma foliação milonítica dúctil, aos quais se sobrepõe uma deformação semi-frágil e frágil que se manifesta numa miríade de planos de cataclase. O *fabric* tectónico dominante é marcado por um forte *fabric* planar-linear, que corresponde a uma foliação milonítica do tipo S-C-C', com as foliações S-C a surgirem frequentemente transpostas, e afectadas por cisalhamentos extensionais (C'), reflexo da forte deformação não coaxial ali concentrada.

A análise espacial multifásica das estruturas auríferas reflecte, em grande medida, o somatório dos efeitos das várias etapas da génese e enriquecimento das mineralizações, da deformação dúctil progressiva e da deformação frágil subsequente. Os corpos mineralizados, associados a processos hidrotermais, são contemporâneos da deformação. **Chichorro, 2006**, descreve várias evidências de relação entre o metamorfismo de alta temperatura e a deformação dúctil

cisalhante. As reacções de desidratação metamórfica e consequente segregação de fundidos e fluidos hidrotermais exsolvidos são sin-cinemáticas, e são testemunhados pela orientação preferencial adquirida pelas paragénese de alta-temperatura e pelo claro controlo estrutural das segregações quartzosas, associadas ou não, a enriquecimentos em ouro. O autor sugere, inclusivamente, ser esta a primeira fase de concentração do ouro, o qual foi posteriormente re-concentrado à medida que novos fluidos hidrotermais, a menor temperatura entram em cena.

Os corpos mineralizados gerados em regime de deformação transcurrente progressiva não coaxial podem aparecer em diferentes direcções do espaço, estando no entanto, na sua maioria, dispostos sub-paralelamente à foliação milonítica. A deformação dúctil progressiva cria sucessivamente novos espaços em dilatação (veios de quartzo), deformando e reorientando os pré-existentes. Este processo cíclico de formação de estruturas dilatacionais, geração, escape e precipitação de fluidos mineralizados, fica materializado em zonas de enriquecimento em Au, a diferentes escalas, com distintas orientações no espaço. **Chichorro, 2006**, mostra que a lineação de estiramento mineral observada (marcada pelo hábito acicular da silimanite e pelas faces {001} da biotite, juntamente com a orientação preferencial da forma dos objectos mono e poliminerálicos elípticos) caracteriza o regime de deformação extensional com a direcção de alongação finita máxima sub-horizontal. A deformação contínua fica, desta forma, expressa em estiramento e boudinagem, paralelos à foliação milonítica, dos níveis mais competentes e dos veios de quartzo, desenvolvendo-se frequentemente, estruturas do tipo “pinch and swell”, acentuadas por influência dos planos extensionais C'. Todo este processo incentiva a ruptura e descontinuidade entre os corpos geológicos, paralelamente à direcção de estiramento sub-horizontal. Só por si, este mecanismo explicaria a tendência para a isotropia paralelamente à foliação milonítica. No entanto, este efeito pode ser aparente, na medida que, pode resultar por defeito da escala de leitura (pseudo-isotropia por efeito de escala).

Em suma, uma eventual anisotropia na génese dos corpos mineralizados primários, condicionada por condições locais de tensão associada à tectónica transcurrente vigente (controlo estrutural), é, por influência da deformação progressiva dúctil, interrompida por um processo multi-escala contínuo e dúctil, que tende a estirar e romper (mecanismos de «*pinch-and-swell*» e «*necking*») os objectos geológicos segundo um regime extensional heterogéneo com alongação finita máxima subhorizontal.

A dinâmica associada ao fluxo plástico em condições de metamorfismo de médio a alto grau explica, apenas em parte, a ruptura e a descontinuidade dos objectos geológicos. Com efeito, os levantamentos de campo (**Chichorro, 2006**) demonstram que a Zona de Falha da Boa Fé, representa uma faixa complexa NW-SE estreita (0,1 – 1km largura) onde se assiste à partição da deformação dúctil e frágil, o qual fica expressa numa rede anastomosada de acidentes NW-SE e WNW-ESE frágeis e semi-frágeis que delimitam, a várias escalas, sectores onde imperam os

mecanismos cristal-plásticos. Esta geometria é posteriormente afectada por uma série de falhas frágeis, NE-SW a NNE-SSE, que delimitam e influenciam a translação lateral e a rotação de uma série de blocos. O efeito dos acidentes semi-frágeis e frágeis vem incrementar a complexidade do sistema, contribuindo para a ruptura dos marcadores, o que também tem uma influência directa, na ausência de continuidade dos corpos mineralizados e por conseguinte na configuração teórica de um modelo isótropo.

7.2. SIMULAÇÃO SEQUENCIAL DA INDICATRIZ

Os processos de simulação estocástica, onde se insere a SIS, são capazes de reproduzir as características estatísticas e de continuidade espacial da variável em estudo, de modo a permitir quantificar a incerteza associada a cada valor simulado. Refira-se ainda que a caracterização da morfologia de uma mineralização complexa, e onde a interpretação heurística apresente significativa relevância, só fica validada após o cruzamento da informação geoestatística com a geológica e conhecidas as incertezas referentes a cada ponto do modelo.

A SSI foi realizada na versão paralelizada SSINDIC do software geoMS (Nunes, 2007), tendo como ficheiros de entrada os dados de ouro transformados para uma variável categórica com 3 modalidades (alto, médio e baixo) e o cubo de probabilidades locais de ocorrência de cada classe aurífera, em cada célula do volume modelado.

Foram geradas 100 realizações (imagens), tendo o processo de simulação sido efectuado em duplicado, respectivamente com os modelos teóricos de variograma esférico e exponencial. Srivastava, 2005, considera que a utilização de diferentes modelos de variograma teórico tem influência no contorno das imagens, naquilo a que denomina de "*degree of smoothness*", isto é, a diferença na suavidade do contorno (ruído) dos corpos é determinada pelo modelo teórico utilizado no ajuste do variograma respectivo.

A título de exemplo, na Figura 7.14 apresentam-se as imagens simuladas obtidas com os dois modelos teóricos. A verde são os corpos mineralizados correspondentes à classe 2 (0,1-1g/ton) e a laranja os correspondente à classe 3 (>1g/ton). A classe 1 não apresenta cor respectiva, correspondendo aos espaços vazios (a branco, abaixo do recorte da topografia). No presente caso de estudo, as imagens obtidas com os dois modelos de variograma são idênticas, sendo difícil a escolha de um modelo em detrimento de outro. A diferença expectável com a utilização de diferentes modelos centrava-se no "ruído" do contorno dos corpos mineralizados, mas não é visível. O que se passa na realidade, é que a diferença de forma das funções esférica e exponencial é compensada pelos diferentes patamares das duas estruturas e pelas amplitudes;

nas figuras dos variogramas, mesmo com modelos diferentes as funções teóricas passam praticamente pelos mesmos pontos.

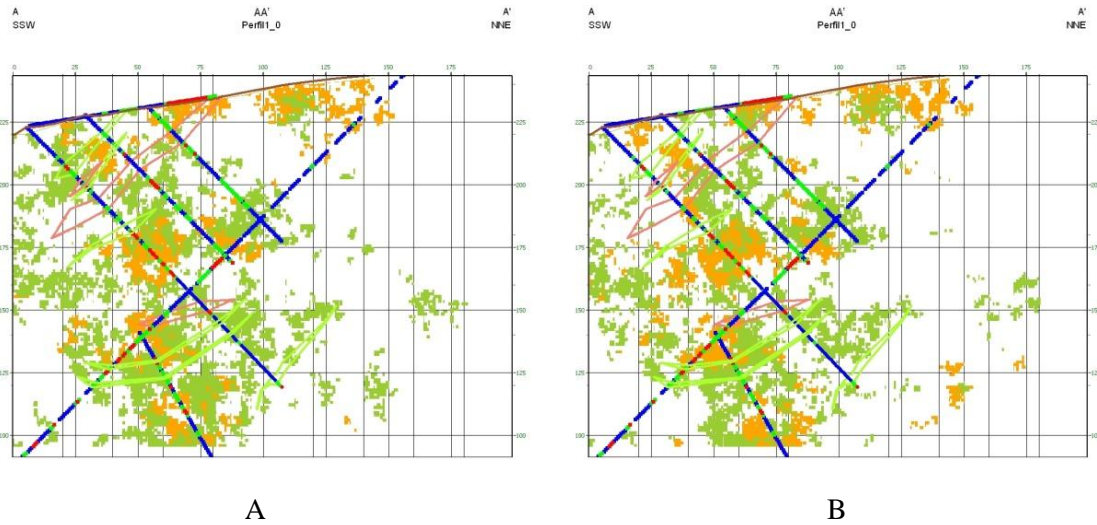


Figura 7.14 – Imagens simuladas no Perfil 1: A) modelo teórico esférico; B) modelo teórico exponencial.

Não havendo diferenças práticas significativas entre os dois modelos, optou-se por utilizar o modelo esférico, por ser considerado como um dos mais aplicados em geoestatística relacionada com as Ciências da Terra (Soares, 2006; Luís, 2004).

7.2.1. VALIDAÇÃO DAS IMAGENS SIMULADAS

A validação das imagens obtidas com o algoritmo da simulação sequencial é assegurada por controlos de qualidade baseados nos pressupostos teóricos da simulação e na coerência entre as imagens simuladas e o modelo conceptual da realidade. Nesta fase do presente estudo, foram analisados os seguintes aspectos, o último dos quais subjectivo:

- i. Verificação do cumprimento local dos valores experimentais nas imagens simuladas;
- ii. Comparação entre as proporções experimental e simulada de cada classe aurífera por litogrupo;
- iii. Comparação dos variogramas das classes auríferas nas imagens simuladas com o modelo utilizado nos dados experimentais;
- iv. Cruzamento da informação geológica conhecida com as imagens simuladas, para avaliar a existência de incoerências entre o conhecimento geológico da região e os resultados obtidos (Capítulo 7.2.2).

Para a verificação do cumprimento dos valores experimentais nas imagens simuladas observaram-se várias imagens simuladas sobrepostas com os dados de partida. De facto, é

assumpção do algoritmo da simulação sequencial que os valores simulados são condicionados aos dados experimentais. No algoritmo implementado no SSINDIC, o condicionamento pode ser feito por alocação directa dos valores experimentais à malha de nós a simular (opção *data nodes*) – condicionamento exacto – ou então misturar os nós a simular com os dados experimentais (opção *two part search*) – condicionamento não exacto (Almeida, 1999; Nunes, 2007). O condicionamento exacto é preferível mas só deve ser utilizado quando a malha de nós é da mesma ordem de grandeza do espaçamento dos dados experimentais, pelo menos numa direcção. Por essa razão, no presente caso de estudo utilizou-se a opção de condicionamento exacto (dados experimentais com suporte de 1m e malha de nós a simular com 1m de espaçamento) e por isso observou-se coincidência entre os valores experimentais e os valores simulados nas mesmas localizações.

Apresentam-se de seguida (Tabela 7.1) as proporções das classes auríferas em cada litogrupo obtidas com as simulações e respectiva comparação com os valores das proporções originais constantes no volume modelado. Seleccionaram-se, ao acaso, quatro realizações: 1, 15, 42 e 98 que irão servir de exemplo neste capítulo.

Tabela 7.1 - Comparação das proporções de cada classe aurífera das imagens simuladas e dos dados experimentais.

Litogrupo	Classe aurífera	Dados experimentais	Realizações			
			1	15	42	98
1	1	0,671	0,668	0,668	0,668	0,667
	2	0,260	0,258	0,259	0,258	0,260
	3	0,070	0,075	0,073	0,074	0,074
3	1	0,588	0,595	0,589	0,592	0,596
	2	0,364	0,354	0,341	0,330	0,342
	3	0,049	0,050	0,069	0,078	0,062
4	1	0,801	0,767	0,762	0,756	0,765
	2	0,156	0,183	0,161	0,181	0,181
	3	0,043	0,050	0,077	0,062	0,053

De modo genérico, as proporções de cada classe aurífera nas imagens simuladas é muito semelhante à dos dados experimentais. As principais diferenças são notadas para a classe aurífera três, particularmente nos litogrupos 3 e 4. O facto desta classe apresentar menor proporção relativamente à totalidade dos dados torna-a mais susceptível à variação de frequência, principalmente nos litogrupos 3 e 4 que são por sua vez os menos frequentados.

Seguidamente faz-se a análise comparativa dos variogramas, gráficos 7.25 a 7.28, onde as direcções (0,0), (90,0) e (0,90) correspondem respectivamente aos eixos Y, X e Z.

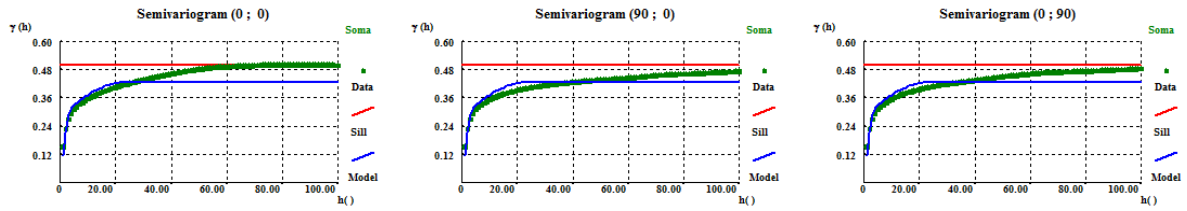


Gráfico 7.1 – Variogramas da realização 1. As direcções (0,0), (90,0) e (0,90) correspondem respectivamente aos eixos Y, X e Z.

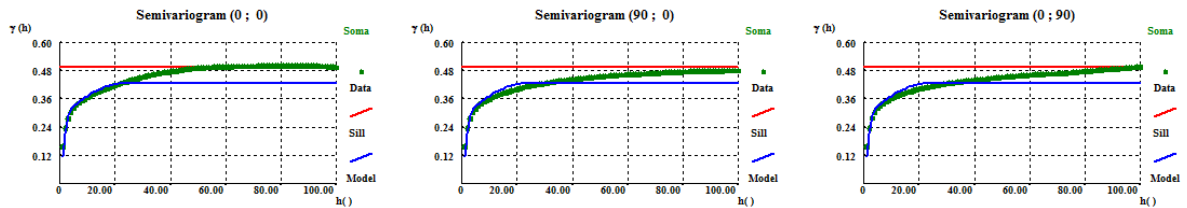


Gráfico 7.2 - Variogramas da realização 15. As direcções (0,0), (90,0) e (0,90) correspondem respectivamente aos eixos Y, X e Z.

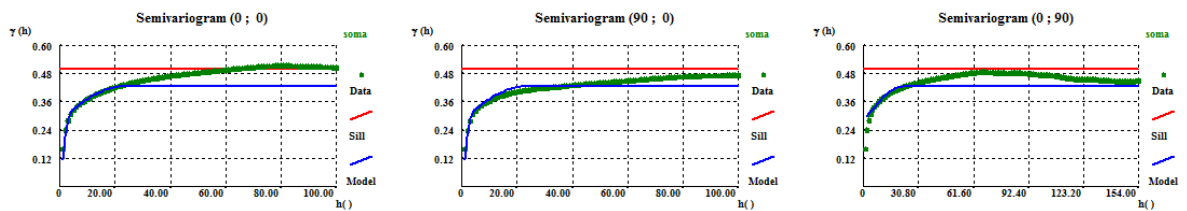


Gráfico 7.3 - Variogramas da realização 42. As direcções (0,0), (90,0) e (0,90) correspondem respectivamente aos eixos Y, X e Z.

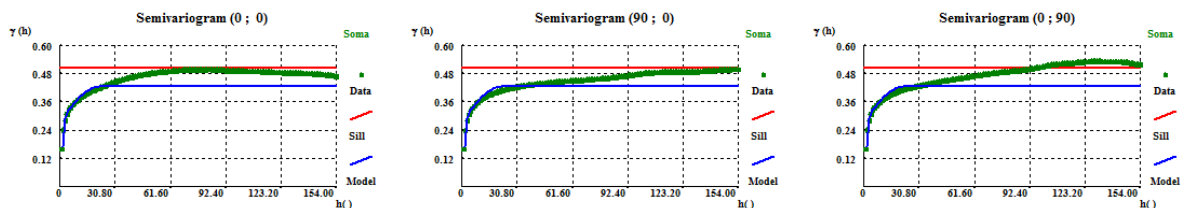


Gráfico 7.4 - Variogramas da realização 98. As direcções (0,0), (90,0) e (0,90) correspondem respectivamente aos eixos Y, X e Z.

Relativamente aos variogramas, observa-se que a função teórica sobrepõe-se bastante bem aos primeiros pontos dos valores experimentais (primeira estrutura) mas, mal aos pontos do variograma experimental relativos à segunda estrutura, Também o patamar das imagens simuladas é significativamente mais elevado. Por isso, as imagens simuladas apresentam maior continuidade relativamente aos dados experimentais.

A diferença de patamares explica-se porque o ajustamento do modelo teórico aos dados experimentais foi feito com todos os dados experimentais, que têm proporções diferentes dos dados que foram efectivamente utilizados na área de simulação bastante mais restrita.

Relativamente às diferenças encontradas para os pontos do variograma experimental correspondentes à segunda estrutura (que nas imagens apontam para amplitudes da ordem de mais de 60m), acredita-se que esta diferença se deve principalmente ao condicionamento das proporções locais (informação dos litogrupos). As proporções impostas pelos litogrupos são dominantes nas zonas não amostradas, que representam mais de 70% do volume a simular, e impõem maior continuidade ao modelo. Constatando esta evidência de aumento das amplitudes da segunda estrutura dos variogramas, a única hipótese para aproximar os variogramas das imagens simuladas seria fazer um pós-processamento das simulações por *Simulated Annealing* (Almeida, 1999).

Assim sendo, e tendo sido analisados todos os pontos de validação objectivos, certifica-se que as características estatísticas comparadas entre os dados amostrais e as imagens simuladas são aceitáveis para os objectivos deste estudo, pelo que, do ponto de vista do cumprimento dos requisitos do algoritmo da simulação sequencial, as imagens obtidas são admissíveis.

7.2.2. VALIDAÇÃO GEOLÓGICA DAS IMAGENS SIMULADAS

Nesta etapa do trabalho é peremptório validar as imagens obtidas, fazendo o cruzamento com o conhecimento geológico conceptual da mineralização de Casas Novas.

Para validar as imagens é necessário que sejam verificadas algumas características geológicas, constantes na bibliografia consultada, com significativa influência na morfologia das zonas mineralizadas. Destaca-se a principal: **Chichorro, 2006** descreve que, embora haja uma evidente relação espacial entre os diques leucograníticos e as mineralizações, estes não são coincidentes. Quer-se com isto dizer que, qualquer imagem simulada que apresente mineralização no interior destes corpos não pode ser validada.

Foram estabelecidos vários critérios de análise de forma a normalizar os comentários a realizar às várias imagens a validar. Pretende-se com isto seguir sempre a mesma linha de pensamento de validação das imagens, alterando-se, como é óbvio, sempre que se verifique algum comentário que o justifique. Os critérios considerados são os seguintes: i) Localização das zonas mineralizadas, se no interior dos corpos ou na transição? E se na transição, de quais corpos? e ii) Forma das mineralizações e orientação que apresentam.

Nesta análise foram mantidas as realizações já utilizadas anteriormente 1, 15, 42 e 98. Esta análise é apresentada para os 7 perfis onde foram digitalizados os contornos dos litogrupos

(Figuras 7.16 a 7.22). A visualização perfil a perfil permite o cruzamento eficaz com os dados das sondagens e, também, a intersecção das imagens com os contornos dos litogrupos. A verde encontra-se representada a classe aurífera 2 (médio), enquanto que a laranja representa-se a classe aurífera 3 (alto).

Na Figura 7.15 ilustram-se as imagens simuladas em toda a região estudada correspondentes ao modelo final.

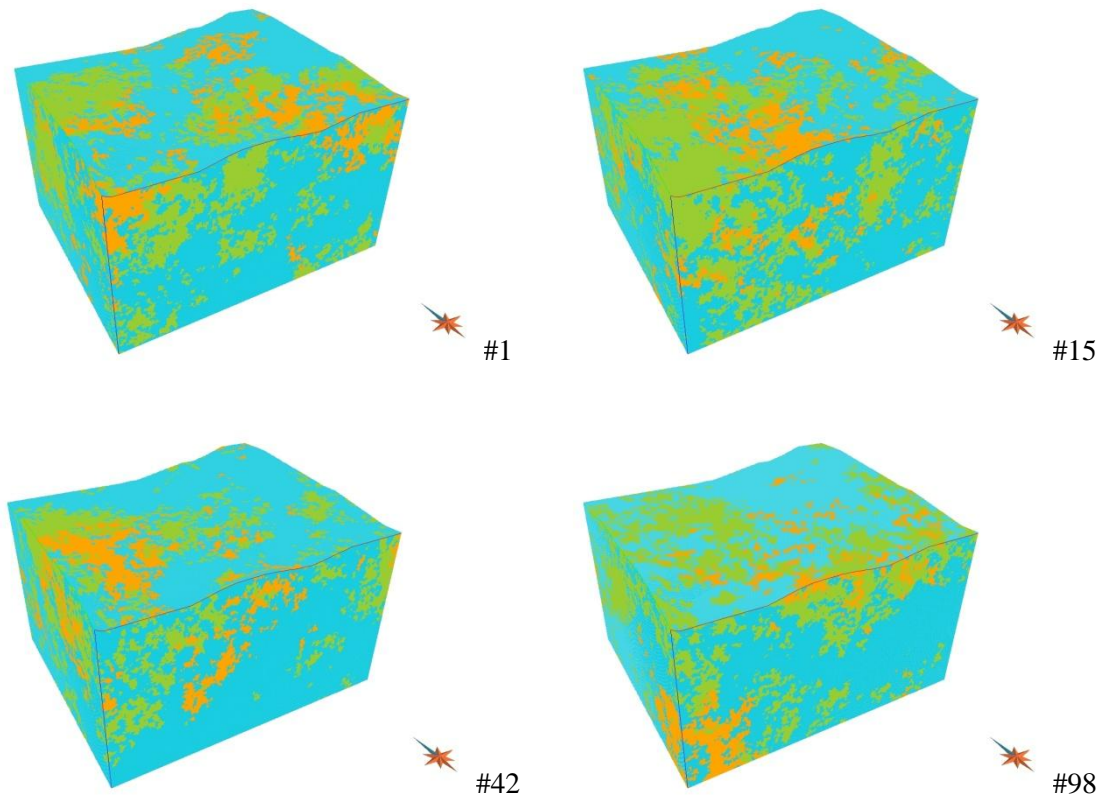


Figura 7.15 – Cubos simulados realizações #1, #15, #42 e #98.

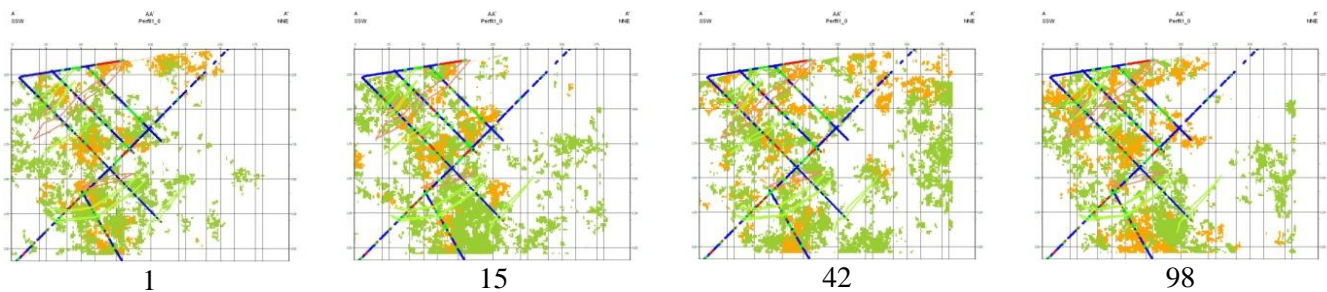


Figura 7.16 – Imagens simuladas no perfil 1. Realizações 1,15,42 e 98.

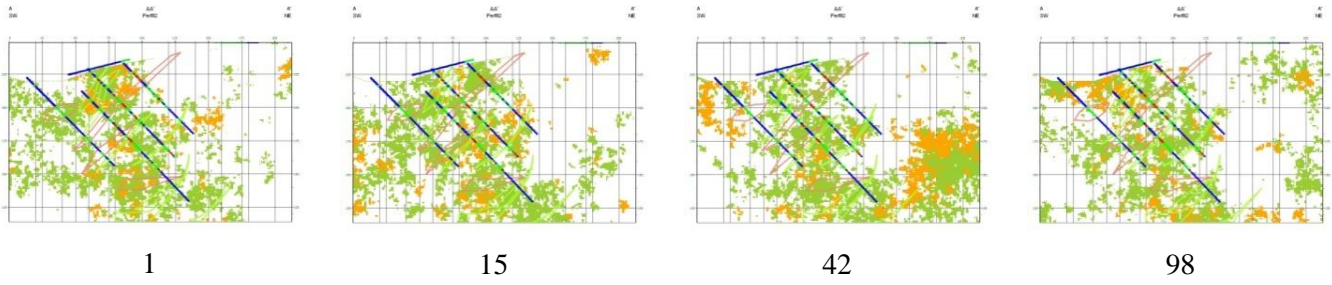


Figura 7.17 – Imagens simuladas no perfil 2. Realizações 1,15,42 e 98.

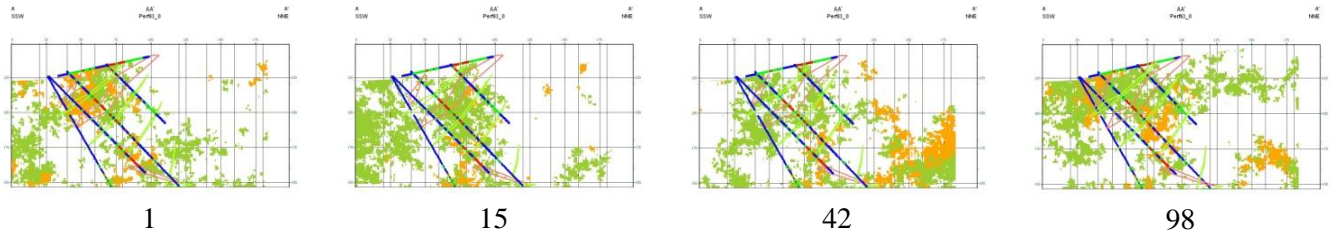


Figura 7.18 – Imagens simuladas no perfil 3. Realizações 1,15,42 e 98.

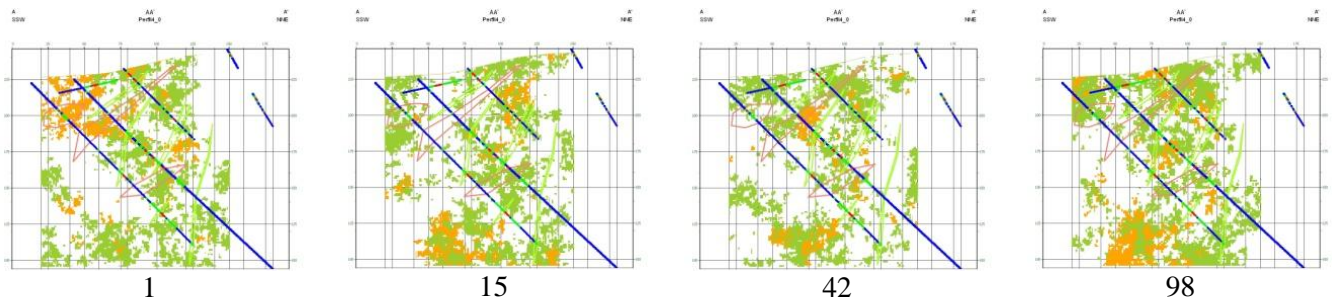


Figura 7.19 – Imagens simuladas no perfil 4. Realizações 1,15,42 e 98.

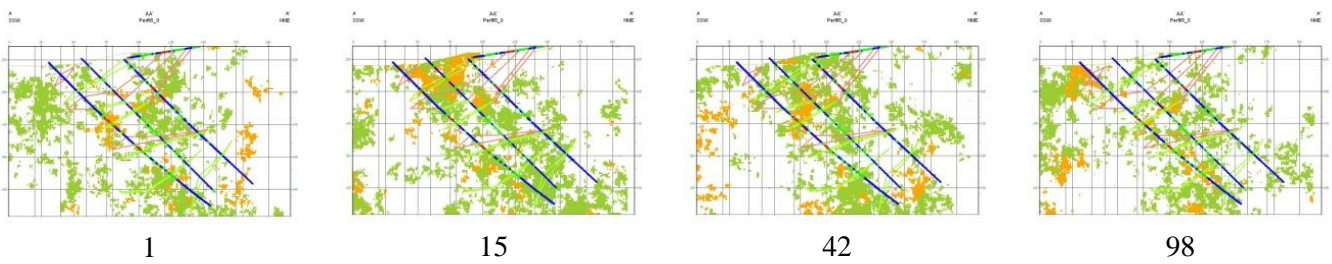
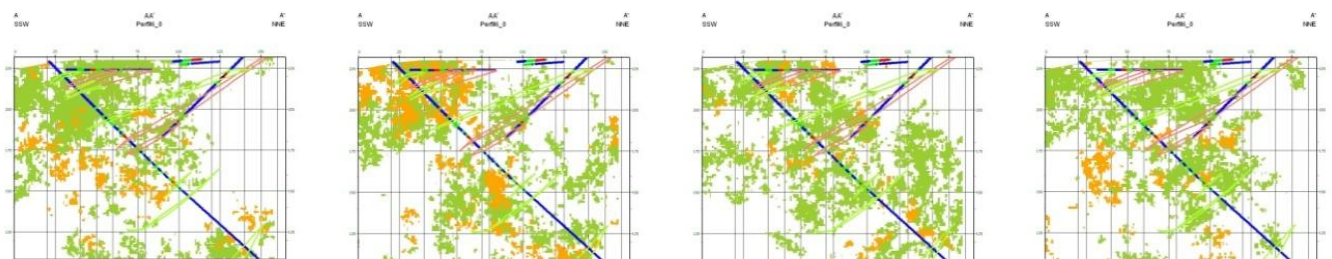


Figura 7.20 – Imagens simuladas no perfil 5. Realizações 1,15,42 e 98.



1 15 42 98

Figura 7.21 – Imagens simuladas no perfil 6. Realizações 1,15,42 e 98.

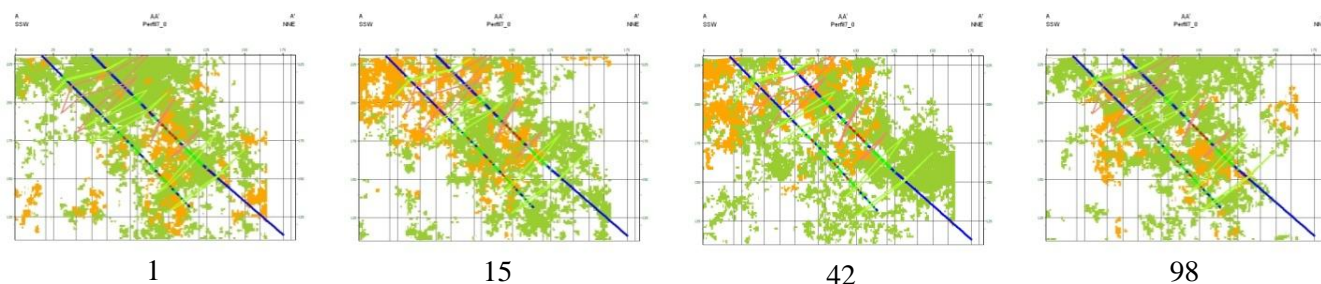


Figura 7.22 – Imagens simuladas no perfil 7. Realizações 1,15,42 e 98.

i. Análise da coerência com os litogrupos

De um modo genérico a maioria das imagens não apresenta intersecção entre os pontos da classe três (>1g/ton) e os diques leucocráticos. No entanto, como validar ou não, as imagens nas quais essa intersecção existe? Existem alguns factores que podem contestar o real cruzamento da informação referida. Considere-se a distância aceite para a projecção no perfil, ou seja, a distância máxima numa direcção perpendicular ao perfil, na qual todos os objectos nela contidos são projectados no perfil. Para todas as imagens aqui apresentadas, essa mesma distância foi de 5m, podendo por isso, questionar-se a real sobreposição entre a classe aurífera três e os diques leucocráticos. Por outro lado, nunca se verificou um total cruzamento, ou seja, em nenhuma imagem se observa um corpo geológico pertencente ao litogrupo 4 totalmente preenchido pela classe 3. Esta observação levanta também a questão da modelação dos corpos. Uma vez que os seus contornos foram traçados manualmente, e construídos com base no digitalizado, as suas dimensões podem não corresponder exactamente ao desenhado, isto é, as transições deve ser observada com um determinado grau de tolerância, quanto à problemática das mineralizações superiores a 1g/t estarem localizadas no interior dos diques leucocráticos. Acrescenta-se ainda que a amostragem efectuada a partir dos logs e das sanjas e sondagens engloba apeans troços de dimensão igual ou superior a um metro, pelo que a localização dos corpos, utilizada para a sua modelação pode estar sujeita a erros inerentes do processo de arredondamento.

Tendo em conta os factores referidos, não será feita uma afirmação de validação (ou não validação) das imagens obtidas. Serão apenas referidas as imagens simuladas, nas quais as sobreposições observadas se consideram significativas. Assim, as imagens são as seguintes: Figura 7.16, #42 e #98, Figura 7.17, #1, Figura 7.18, #1, Figura 7.19, #1 e #42, Figura 7.20, #42, Figura 7.21, #15 e Figura 7.22, #15 e #42. É, no entanto, possível afirmar, que as simulações, por si só, não validam zonas não mineralizadas, mesmo tendo em consideração a

informação secundária inerente aos corpos geológicos. O que conseqüentemente indica que a análise das imagens simuladas não deve ser independente, ou seja, deve tomar sempre em consideração a observação e interpretação geológica.

Relativamente à relação com a transição ou algum litogrupo em particular, a frequência de ocorrência não é significativa para certificar alguma dessas questões. Foi observado, em algumas imagens, uma proximidade com as zonas de transição de corpos, mas não em número significativo que ateste essa hipótese. Destacam-se as imagens do perfil 7: Figura 7.22, #1, #15, #42 e #98. Quanto à relação com algum litogrupo específico, não é possível realizar uma observação coerente. O litogrupo 1 representa 97,42% do volume simulado, pelo que a maioria das manchas mineralizadas encontra-se, obviamente, nesse litogrupo, o que, contudo, não quer afirmar a existência de uma relação com essas rochas em particular.

Na maioria das imagens, as manchas das classes auríferas médio e alto apresentam-se dispersas, sugerindo independência na sua morfologia e posição no espaço. Este facto vai de encontro à ideia original de um modelo isotrópico para a distribuição das zonas mineralizadas. No entanto, quando se realiza uma análise mais pormenorizada verifica-se alguma consistência na distribuição espacial dos dados, quando analisadas as duas classes (média e alta). A visualização das imagens sugere também, por vezes, sinais gráficos (por ausência ou concentração de pontos) que evocam uma relação causa-efeito passível de ser contextualizada com as observações geológicas. A título de exemplo observe-se a Figura 7.21 #15. É possível dividir a imagem em três sectores, sub-perpendiculares à direcção da sondagem maior. Tal facto pode ser revelador de uma influência da fracturação da região na localização das mineralizações, indo ao encontro da evidência de que a deformação frágil pode contribuir significativamente para obscurecer a eventual existência de anisotropias.

ii. Análise da forma das mineralizações e respectiva orientação

Tal como já foi referido, as classes auríferas 2 e 3 apresentam uma localização espacial muito dispersa, o que à partida não sugere qualquer alinhamento preferencial nem uma morfologia definida. De um modo genérico, a grande maioria das imagens apresenta uma orientação sub-horizontal. Acontece, por vezes, nalgumas imagens particulares, a sugestão de um alinhamento preferencial sub-vertical, como é o caso da Figura 7.17 #42. Noutras, a disposição das manchas mineralizadas sugere um alinhamento sub-paralelo com a posição espacial dos diques leuco e mesocráticos, no perfil em análise. Tal pode ser indicador de um controlo estrutural/litológico na morfologia das zonas mineralizadas, isto é, os diques terão funcionado como transmissores de calor indutor da circulação de fluidos mineralizados e da reconcentração do ouro. No entanto, esta afirmação representa uma mera suposição, dado a pouca consistência das imagens

simuladas nesse sentido. Ainda assim, as Figura 7.16 #15 Figura 7.17 #15 e Figura 7.22, #1, #15, #42 e #98 são bons exemplos desse paralelismo espacial.

Por último há que fazer uma análise à persistência consistente da elevada concentração das manchas mineralizadas junto à superfície do volume modelado, cujos melhores exemplos são todas as imagens do perfil 7 (Figura 7.22). À superfície os teores medidos nas sanjas têm, necessariamente, de apresentar frequências das classes 2 e 3, para que se justifiquem aqueles valores. Do ponto de vista geológico, as grandes concentrações de ambas as classes, mas especialmente da segunda, pode ser simplesmente explicado através de enriquecimento supergénico.

7.2.3. ANÁLISE DA ENTROPIA DAS IMAGENS SIMULADAS

Nesta etapa final do trabalho caracterizaram-se espacialmente as zonas de maior incerteza do modelo morfológico de teores, que afinal é uma das vantagens dos modelos geoestatísticos de simulação.

Para populações categóricas, uma medida de incerteza é designada por entropia da distribuição das probabilidades locais (Goovaerts, 1997; Almeida, 1999), que pode ser definida para um conjunto de K fases (onde $p_k^*(x)$ é a média dos 100 valores simulados para cada célula x do volume simulado) do seguinte modo:

$$H(x) = \sum_{k=1}^K [\ln p_k^*(x)] p_k^*(x) \quad 7.1$$

A entropia varia entre 0 (pontos onde não existe incerteza, amostras) e $\ln K$. Pode ser apresentada com valores entre 0 e 1:

$$H_R(x) = \frac{H(x)}{\ln K} \quad 7.2$$

De seguida apresentam-se as imagens de entropia nos sete perfis estudados (Figura 7.23) e na área total (Figura 7.24)

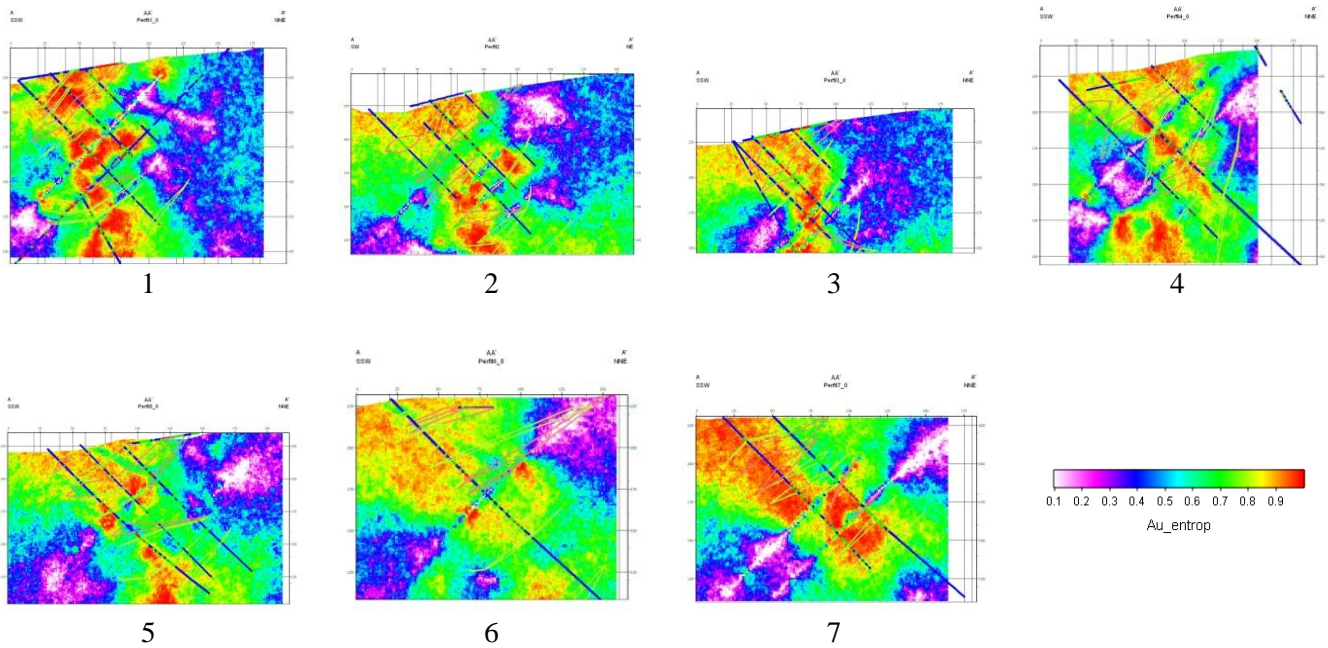


Figura 7.23 – Entropia das imagens simuladas nos perfis 1 a 7

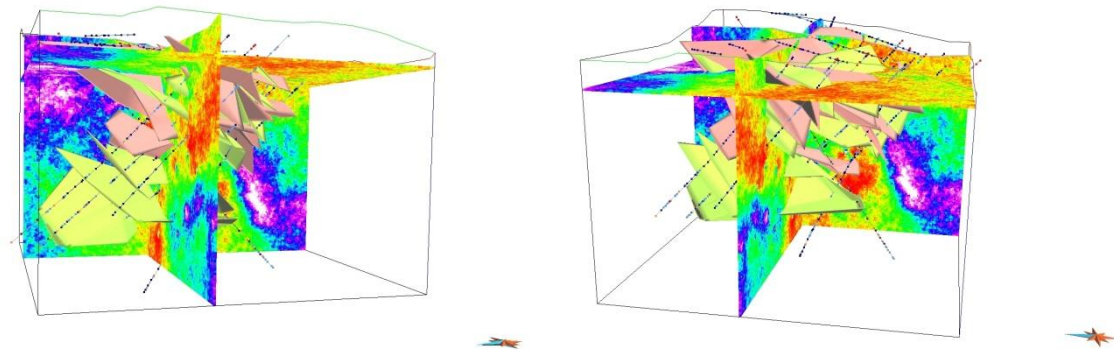


Figura 7.24 – Cruzamento do mapa da entropia com os corpos modelados, as sanjas e sondagens.

Nesta análise seria expectável a obtenção de baixa entropia nas zonas amostradas, e elevada nas localizações não amostras. No entanto, o resultado obtido é em muitos locais contrário ao referido. Como justificar estas aparentes contradições?

A primeira contradição diz respeito às manchas de baixa entropia já fora área de influência das amostras, por exemplo, a região dos cantos inferior esquerdo e superior direito. Nestes locais, à falta de informação *hard*, prevalece a informação *soft*, ou seja, as proporções locais que foram impostas. Estas proporções, como indicam cerca de 70% para a fase 1 fazem com que a alternância de valores, nestas zonas, seja comparativamente mais baixa do que aquelas onde existem dados *hard*. A segunda contradição é observada em grandes alinhamentos de baixa

entropia onde aparentemente não existem dados. Aqui o que acontece é que não estão a ser mostradas no perfil apenas as sondagens que foram utilizadas na digitalização dos litogrupos. A terceira contradição diz respeito a valores elevados na vizinhança de algumas sondagens. Aqui o que acontece é que existe grande alternância de valores (teores de ouro) na sondagem e por isso mesmo estas zonas são sempre as zonas de maior incerteza. Também as sondagens representadas podem não estar exactamente sobre o perfil, por isso e porque existe uma primeira estrutura com 4m de amplitude e patamar significativo relativamente à variância, a influência das sondagens somada à intensa variabilidade de teores faz com que as zonas de maior incerteza se concentrem nas zonas potencialmente mais ricas.

Este facto confirma que esta mineralização de Casas Novas é um caso de estudo de elevada complexidade e por isso a caracterização de reservas em fase de pré-avaliação terá sempre uma grande incerteza associada classificando um potencial projecto mineiro no local como de alto risco.

8. DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objectivo a construção de um modelo geológico 3D, a partir do caso de estudo de um subsector das mineralizações de Au de Casas Novas, Montemor-o-Novo, Évora. Para tal, criou-se uma metodologia que utiliza a interpretação geológica, materializada num modelo vectorial 3D, como informação secundária condicionante (*soft data*) num modelo geoestatístico de teores Au (*hard data*), em estrutura matricial. Todo o processo foi realizado em duas grandes etapas: primeiro a construção de um modelo morfológico de litogrupos (interpretação heurística da geologia da região) e, seguidamente, a construção do modelo de teores de ouro, condicionado ao modelo morfológico, com ferramentas geoestatísticas.

Na primeira fase foi realizado um exaustivo tratamento dos dados geológicos, por forma a aferir uma relação discriminante entre a geologia (unidades lito-estratigráficas e estrutura) e os teores de ouro, bem como a avaliação da capacidade de modelação de acordo com o contexto geológico (mineralizações auríferas inseridas em zona de cisalhamento de elevados gradientes de deformação). O resultado culminou na selecção de três litogrupos, com capacidade de modelação, e que apresentam, simultaneamente, uma relação discriminante com os dados geoquímicos disponíveis. A modelação dos respectivos corpos foi realizada com recurso ao software gOcad, com base na construção de sete perfis, representativos do volume em estudo. O término desta primeira etapa é alcançado com a construção de um modelo matricial, caracterizado pelas probabilidades locais, que viriam a condicionar o modelo geoestatístico.

A segunda fase centrou-se no tratamento dos dados geoquímicos (teores de Au), com recurso a ferramentas geoestatísticas, a fim de se criar o modelo final pela SSI. Esta fase revelou uma aparente contradição com as características estruturais do sector, nomeadamente a forte anisotropia tectónica plano-linear (*fabric S-L*) descrito por **Chichorro, 2006**, e **Pereira et al, 2007**. Com efeito, a variografia espacial, sugere a existência de um modelo espacial isotrópico e de baixa continuidade. O enquadramento geo-tectónico à macro e meso-escala, conforme estabelecido por aqueles autores, aponta para a existência de um controlo estrutural/litológico condicionante da morfologia das mineralizações, o que conseqüentemente impõe uma certa anisotropia dos dados. Esta diferenciação de resultados constitui um dos pontos de discussão da presente dissertação.

Tal como já referido, tentou-se, com este estudo, criar uma ponte entre o conhecimento geológico (que se pressupõem de elevado cariz interpretativo) e as ferramentas geoestatísticas, por forma a criar um modelo 3D final imparcial e geologicamente aceite. Para tal, foi imprescindível tomar em consideração ambos os conhecimentos e compreender como se complementam, sem que se ignore qualquer dado ou facto.

Segundo a análise geoestatística, nomeadamente a variografia multifásica, as mineralizações de um sub-sector da zona de Casas-Novas são caracterizadas por um modelo isotrópico. Esta é, de facto, a opinião assumida no presente trabalho, suportada pelas evidências reveladas na 2ª fase da metodologia aplicada, resultado dos variogramas multifásicos obtidos, e que, em parte, pode ser explicada pelo contexto geo-tectónico do sector em estudo. Toda a modelação geoestatística foi realizada com base nestes resultados.

No entanto, a complexidade do sistema em estudo, muito devido ao estilo estrutural vigente na área, obriga a uma continuidade nos estudos, como forma de averiguar outras possibilidades, testando outros métodos de abordagem estatística e tratamento dos dados.

Numa tentativa de estabelecer os factores que terão influenciado a morfologia e distribuição espacial das zonas mineralizadas, propõe-se, com base no conhecimento actual, uma possível sequência evolutiva dos processos intervenientes na individualização do jazigo

- i. Deformação plástica contemporânea das reacções metamórficas de médio –alto e alto grau, que implicam processos de desidratação metamórfica com geração de fundidos e líquidos hidrotermais (Hipótese 1 - Fluidos metamórficos associados ao Au?);
- ii. O processo contínuo de deformação é acompanhado por processos de fusão parcial e consequente geração de líquidos magmáticos;
- iii. Estes fundidos magmáticos (puramente anatéticos) tendem a ascender (controlo estrutural é fundamental) e a cristalizar, em conjugação com os processos de cristalização fracionada previstos. (Hipótese 2 - Eventuais exsolvidos aquosos magmáticos (associados ao Au?);
- iv. Com a diminuição da temperatura entra-se na fase do percurso metamórfico retrógrado (de acordo com **Ribeiro, 1994**, existe relação entre a mineralização e esta fase do processo).

Importa, também, sublinhar alguns aspectos significativos que devem ser levados em linha de conta na análise da morfologia e etapas evolutivas do jazigo:

- a) Existe claramente um controlo estrutural das mineralizações, na medida que os fluidos hidrotermais condicionadores da lixiviação, transporte e precipitação do ouro terão, nas suas diversas fases, circulado por zonas de fraqueza estrutural (anisotropias prévias e fracturas extensionais relacionadas com a dinâmica da zona de falha da Boa Fé). A tectónica extensional local, associada ao regime transcurrente geral induz o estiramento crustal, e consequentemente, a ascensão das isotérmicas, mecanismo que terá estimulado as reacções metamórficas de alta temperatura e baixa pressão descritas por **Chichorro, 2006**, e simultaneamente, a circulação de fluidos. Vários ciclos de circulação de fluidos, condicionados pela tectónica e por fontes de calor regionais e

locias (ex, corpos intrusivos granodioríticos) terão contribuído para a concentração e reconcentração do ouro. Tal é sugerido por **Ribeiro, 1994** e **Chichorro, 2006**,

Em suma, factores como sejam o alinhamento e continuidade geral das diversas ocorrências ao longo da ZFBF, e o forte *fabric* milonítico plano-linear observado no encaixante das mineralizações denota uma predisposição espacial que, conseqüentemente pode sugerir a existência de uma anisotropia vincada na morfologia dos jazigos de ouro. No entanto, os resultados geoestatísticos mostram que, ao nível da distribuição no espaço, dos corpos mineralizados, pelo menos à escala local de observação dos dados, essa anisotropia expectável não é detectada.

Assim sendo, qual o motivo da contradição com os resultados geoestatísticos?

São claros os resultados obtidos pela análise espacial realizada. Foram analisados infindáveis variogramas, na tentativa de encontrar algum ponto comum com a informação bibliográfica, mas na realidade, a grande maioria dos variogramas analisados culminou em resultados inconclusivos. Ora, tal pode ser indicador de dois cenários: i) existe realmente uma anisotropia e não foi captado por algum motivo; ou ii) existem limitações na continuidade espacial dos corpos, em todas as direcções do espaço, com reflexo a todas as escalas, que não permite uma relação de continuidade espacial.

Num exercício de tentar aferir qual, dos dois cenários, representa o presente estudo, crê-se vantajoso enumerar todos os factores que podem influenciar, quer o resultado final obtido, quer a contradição entre a variografia e a bibliografia consultada, e daí tentar retirar ilações:

- i. A malha dos dados não é nem regular nem aleatória, o que se repercute em variações de escala significativas, nas diferentes variações do espaço. O resultado são variogramas com poucos pares de pontos e conseqüentemente pouco robustos para permitir retirar conclusões. Verificou-se a existência de duas estruturas (uma a 4-5m e outra a 20-25m), cuja influência é muito significativa nos variogramas obtidos, uma vez que, quando a primeira estrutura não é detectada são sentidas fortes influências na amplitude da segunda estrutura;
- ii. O volume modelado é muito inferior ao considerado pela campanha de prospecção, e a proporção dos corpos geológicos é significativamente diferente. Acrescente-se que a distância entre sondagens é, na maioria dos casos, superior à amplitude da segunda estrutura;
- iii. A informação geológica disponível na decrção das sondagens e sanjas, carece de uma norma representativa e lógica, face ao actual estado do conhecimento da região, tendo-se, revelado, em alguns casos, ambígua. Por outro lado, a informação obtida está

incompleta, uma vez que não contempla os trabalhos de prospecção mineira (sondagens e sanjas) efectuados pela empresa *Montemor Resources*. Acrescente-se o invariável arredondamento das amostras descritivas (intervalos dos logs das sondagens), a um patamar mínimo de um metro. Esta normalização dos dados vicia a informação, uma vez que automaticamente exclui a delimitação de veios ou zonas mineralizadas, alguns litótipos e zonas de falha, frequentemente inferiores a um metro. Decididamente esta lacuna dos dados originais interferiu negativamente com a tentativa de modelar tridimensionalmente as zonas mineralizadas e estruturas frágeis (falhas). Todos estes factores apresentam-se preponderantes na modelação morfológica da geologia, que por sua vez apresenta significativa influência na informação secundária condicionante;

- iv. A área em estudo é caracterizada por elevados gradientes de deformação transcurrente, materializada numa foliação milonítica dúctil, à qual se sobrepõe uma deformação semi-frágil e frágil que resulta num forte *fabric* planar-linear, correspondente a uma foliação milonítica tipo S-C-C', denotando-se com esta evidência o elevado grau de deformação do sector em estudo (Pereira *et al*, 2007).
- v. **Chichorro, 2006**, sugere que a lineação de estiramento mineral observada (elongação finita máxima sub-horizontal) caracteriza um regime de deformação extensional. Este regime, expresso em estiramento e boudinagem (paralelos à foliação milonítica), incentiva a rotura e descontinuidade dos corpos geológicos. Este mecanismo poderia, em parte, uma vez que está sujeito a escalas de leitura, explicar a tendência isotrópica dos resultados obtidos.
- vi. Os corpos mineralizados foram gerados num regime de deformação transcurrente progressiva não coaxial (enquadramento regional), o que se reflecte na sua disposição, geralmente sub-paralela à foliação milonítica. Há ainda que considerar que a deformação dúctil progressiva, que ocorre continuamente, cria sucessivos novos espaços de dilatação, deformando e reorientando os pré-existentes. Este processo cíclico é materializado pela precipitação dos fluidos mineralizados nesses mesmos espaços, sendo por isso re-orientados no espaço em resposta à deformação progressiva..
- vii. Levantamentos de campo (**Chichorro, 2006**) revelam a existência de uma rede anastomosada de acidentes NW-SE e WNW-ESSE frágeis e semi-frágeis, que delimitam a várias escalas, sectores onde imperam mecanismos cristal-plásticos. Esta geometria é posteriormente afectada por uma série de falhas frágeis NE-SW e NNE-SSE, que delimitam e influenciam a translação lateral e rotação de uma série de blocos. O efeito desses acidentes contribui para uma ruptura dos marcadores, o que consequentemente pode justificar a ausência de continuidade espacial dos corpos mineralizados (Figura 8.1).

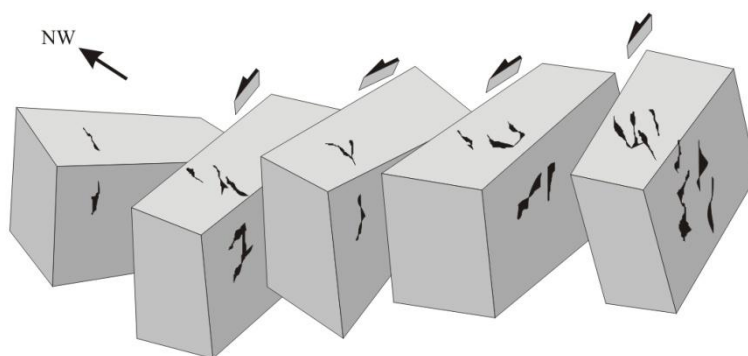


Figura 8.1 – Esquematização da delimitação de vários sectores, consequência da existência de uma rede anastomosada de acidentes NW-SE e WNW-ESSE frágeis e semi-frágeis.

O pequeno volume analisado, quando comparado com a totalidade da área da campanha de amostragem, a não introdução de mais dados geológicos, como os estruturais (modelação do sistema de falhas frágeis e semi-frágeis) e todos os outros condicionantes e factores acima referidos merecem uma revisão, e posteriores estudos com recurso a diferentes métodos.

Poderá ser útil avaliar a transição dos dados experimentais geológicos e geoquímicos (classes auríferas e litogrupos), a fim de avaliar a sua real distribuição no espaço, sendo o algoritmo de análise espacial *multipoint*, em detrimento do *bi-point*, uma ferramenta a testar. A modelação do sistema de falhas e a definição das zonas ocupadas pelos veios de quartzo podem contribuir com informação útil para uma correcta caracterização geológica do modelo morfológico, pelo que é conveniente que qualquer trabalho futuro passe por essas etapas. Acredita-se também ser vantajoso a obtenção dos dados originais (a sua totalidade e sem qualquer arredondamento) para a realização de uma correcta avaliação dos dados disponíveis, beneficiando a construção do modelo morfológico. Outra alternativa será a realização da simulação sequencial da indicatriz com estimação por krigagem simples com médias locais. Desta forma, a informação condicionante seria resultado da krigagem normal cruzada com o cubo modelado, impondo ao modelo um conjunto de dados condicionantes mais "imparcial" e não tão susceptível à disposição dos dados originais.

Outro ponto crítico da presente dissertação é a não obtenção dos variogramas das imagens simuladas totalmente coincidentes com os experimentais. Embora já tenha sido sugerido, acrescenta-se como proposta para trabalho futuro, a revisão dessa etapa do trabalho com um pós-processamento das simulações por *Simulated Annealing* (Almeida, 1999).

O presente estudo pode ser visto como uma contribuição para a criação de uma metodologia que permite integrar, num modelo 3D final, grande parte do conhecimento geológico de uma área mineralizada complexa como a da ZFBF. A análise geoestatística dos teores de ouro revelou-se extremamente útil para visualizar uma forma e orientação dos corpos mineralizados no espaço 3D. Permitiu complementar e validar a interpretação pericial inerente à construção do modelo morfológico, pelo que a sua utilização permite a construção de uma base de trabalho que pode vir a ser complementada com trabalhos futuros. Acrescente-se ainda, que o presente trabalho, com uma vertente pericial e outra estocástica, permitiu a compatibilização entre as duas abordagens na área da cartografia geológica, acreditando-se constituir um contributo válido para o desenvolvimento desta área científica.

9. BIBLIOGRAFIA

- Almeida, A., Soares, A., Reynaud, R., (1993) - Modelling the shape is Several Marble Types in a Quarry, Proc. of XXIV APCOM, *J. Elbrond, X. Tang*, Eds., 3, 452-459.
- Almeida, A., (1999) - Use of Geostatistical Model to Improve Reservoir Description and Flow Simulation in Heterogeneous Oil Fields, Tese de Doutoramento, *Instituto Superior Técnico*.
- Alsop, G.I., Holdsworth, R.E., Shear zones – an introduction and overview, *Geological Society*, London, Special Publication, V.224, pp 1-9.
- Bonnemaison, M., Marcoux, E., (1990) - Auriferous mineralization in shear-zones: A three-stage model of metallogenesis. *Mineralium Deposita*, 25, pp 96-104.
- Bonomi, T., (2009) – Database development and 3D modeling of textural variations in heterogeneous, unconsolidated aquifer media: application to the Milan plain. *Computers & Geosciences*, 35, pp134-145.
- Crespo Blanc, A. Orozco, M., (1988) - The Southern, Iberian Shear Zone: a major boundary in the Hercynian folded belt. *Tectonophysics*, 148, pp 221-227
- Carvalhosa, A., Galopim de Carvalho, A.M., Matos Alves, C. A., Pina, H.L., (1969) - Carta Geológica de Portugal, Notícia Explicativa da Folha 40-A (Évora), *Serviços Geológicos de Portugal*, escala 1:50 000.
- Carvalhosa, A. B., (1977) - Características geológicas do maciço de Évora. (Nota preliminar). *Bol. Soc. Geol. Port.*, Lisboa, vol. XX, fasc. III, p. 283-312.
- Carvalhosa, A., (1983) - Esquema geológico do Maciço de Évora, *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, tomo 69 (2), p. 201-208.
- Carvalhosa, A., Zbyszewski, G., (1994) - Carta Geológica de Portugal, Notícia Explicativa da Folha 35-D (Montemor-o-Novo), *Instituto Geológico e Mineiro*, escala 1:50 000.
- Chichorro, M., Young, S., (1997) – Geology of the Chaminé - Casas Novas – Banhos Area, Montemor-o-Novo, scale 1:5000. *Moriminas – Soc. Mineira de Montemor Lda*.
- Chichorro, M., Pereira, M.F., Apraiz, A., Silva, J.B., (2003) - Syntectonic high temperature / low-pressure metamorphism in the Boa Fé Fault Zone (Évora Massif, Ossa Morena Zone, Portugal), *VI Congresso Nacional de Geologia*, Universidade Nova de Lisboa.

- Chichorro, M., Pereira, M.F., Apraiz, A., Silva, J.B., (2004) - High temperature – low pressure tectonics from the Boa Fé Fault (Évora Massif, Ossa Morena Zone, Portugal): evidences for transtensional tectonics, *Geogaceta*, 34, pp 43-46.
- Chichorro, M., (2006) - Estrutura do Sudoeste da Zona de Ossa-Morena: Área de Santiago de Escoural — Cabrela (Zona de Cisalhamento de Montemor-o-Novo, Maciço de Évora). Unpubl. Ph.D. dissertation, *Universidade de Évora*, Portugal, 502pp.
- Donatis, M., Borraccini, F., Susini, S., (2009) – Sheet 280 – Fosombrone 3D: a study project for a new geological map of Italy in three dimensions. *Computers & Geosciences*, 35, pp19-32
- Drummond, A.E, Ohmoto, H., (1985) - Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Econ. Geol.*, 80, pp126-147.
- Faria, A.F., (1988) - Geology of the Montemor Gold Belt from Tabuleiros to Azinhaga, scale 1:10.000. Rio Tinto Finance & Exploration Ltd., Lisboa.
- Faria, A.F., Chichorro, M. & Young, S., (1997)^a - Geological Compilation Map of the Montemor Gold Belt, scale 1:10.000. Moriminas - *Soc.Mineira de Montemor Lda.*, Montemor-o-Novo.
- Faria, A.F., Chichorro, M. & Amaral, P.K., (1997)^b - Montemor Gold Project, Southern Portugal - Geological Evaluation Report. Moriminas - *Soc. Mineira de Montemor Lda.*, Montemor-o-Novo.
- Feltrin, L., McLellan, J.G., Oliver, N.H.S., (2009) – Modelling the giant, Zn-Pb-Ag Century deposit, Queensland, Australia. *Computer & Geosciences*, 35, pp 108-133.
- Gallerini, G., Donatis, M., (2009) – 3D modeling using geognostic data: the case of the low valley of Foglia river (Italy). *Computers & Geosciences*, 35, pp146-164.
- Goodwin, L.B. & Tikoff, B. (2002)^a. - Competency contrast, kinematics, and the development of foliations and lineations in the crust. *Journal of Structural Geology*, 24, p.1065-1085.
- Goodwin, L.B. & Tikoff, B. (2002)^b - Looking beyond the shear zones: using low-and-high-strain domains to determine bulk #D kinematics. In: transport and flow processes in shear zones. Joint international research meeting. *The Geology Society*, London. P 29.
- Goovaerts, P., (1997) - Geostatistics for Natural Resources Evaluation, *Oxford University Press*, 483 p.
- Guha, J., Achambault, G., Leroy, J.,(1983) - A correlation between the evolution of mineralizing fluids and the geochemical development of a shear zone as illustrated by the Henderson 2 Mine, Québec. *Econ. Geol.*, 78, pp 1605-1618.

- Kearey, F. & Vine, F.J. (1996) - Global tectonics. *Blackwell Science* Second edition.
- Luis, A. A. G. (2004) Utilização de informação auxiliar na estimação e simulação de variáveis regionalizadas. Tese de doutoramento não publicada. *Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico*. 207 pp.
- Mallet, J.-L. (2003). Numerical Geomodeling: The gOcad approach. *23rd June gOcad meeting, Nancy*, 12 pp..
- Martelet, G., Calcagno, P., Gumiaux, C., Truffert, C., Bitri, A., Gapais, D., Brun, J.P., (2004) – Integrated 3D geophysical and geological modelling of the Hercynian Suture Zone in the Champtoceaux area (south Brittany, France). *Tectonophysics*, 382, pp 117-128.
- Moita, P., (2008) - Granitóides no SW da Zona de Ossa-Morena (Montemor-o-Novo –Évora): Petrogénese e Processos Geodinâmicos. Tese de doutoramento não publicada, *Universidade de Évora*, 351 pp.
- Nunes, R. (2008) Paralelização dos Algoritmos de Simulação Sequencial Gaussiana, Indicatriz e Directa. Tese de Mestrado não publicada. *Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia*. 79pp.
- Ochsner, A., (1993) - U-Pb Geochronology of the Upper Proterozoic-Lower Paleozoic geodynamic evolution in the Ossa-Morena Zone (SW Iberia): constraints on the timing of Cadomian Orogeny. PhD Thesis, *ETH Zurich*, 1-249.
- Pereira, H.G., (1979) - Introdução às variáveis regionalizadas. *Técnica*, Número 451/452, Volume XL, Janeiro/Fevereiro/Março, 1997, 89-96
- Pereira, M.F., Silva, J.B., Chichorro, M., (2003) - Internal Structure of the Évora High-grade terrains and the Montemor-o-Novo Shear Zona (Ossa Morena Zone, Portugal), *Geogaceta*, 33, pp79-82.
- Pereira, M.F., Silva, J.B., Chichorro, M., Moita, P., Santos, J.F., Apraiz, A., Ribeiro, C., (2007) - Crustal growth and deformational processes in the Northern Gondwana margin: constraints from the Évora Massif (Ossa-Morena Zone, SW Iberia, Portugal). In: Linnemann, U., Nance, R.D., Kraft, P., Zulauf, G. (Eds.), *The Evolution of the Rheic Ocean: From Avalonian–Cadomian Active Margin to Alleghenian–Variscan Collision*. *Geological Society of America Special Paper*, vol. 423..
- Quesada, C., (1991) - Geological constraints on the Paleozoic tectonic evolution of - tectonostratigraphic terranes in the Iberian Massif. *Tectonophysics*, 185, 225-245

- Quesada, C., (1992) - Evolución tectónica del Macizo Ibérico (Una historia de crecimiento por acreencia sucesiva de terrenos durante el Proterozoico superior y el Paleozoico). In: Gutiérrez Marco, J.C., Saavedra, J., Rábano, I. (Eds.), *Paleozoico Inferior de Ibero-América*. Junta de Extremadura, Mérida, Spain, 173-190.
- Ramsay, J.G. (1980) - Shear zone geometry: a review. *Journal of Structural Geology*, 2, p.83-99.
- Ramsay, J.G. & Huber, M., (1983) - The techniques of Modern Structural Geology. Vol. 1: *Strain Analysis*. Academic Press, London.
- Ribeiro, C. (1994) - Estudo metalogenético da mineralização aurífera do Escoural (Évora). Provas de Apt. Ped. Cient. *Universidade de Évora*, 136 p.
- Ross, M., Parent, M., Lefebvre, R., (2005) – 3D geological framework models for regional hydrogeology and land-use management: a case study from a Quaternary basin of southwestern Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*, 13, pp690-707.
- Sanchez García, T., (2001) - Volcanismo cámbrico en la Unidad de Alconera (sector de Zafra – ZOM – Provincia de Badajoz). *Bol. Geol.Min.*, 112 (3). 89-102.
- Schäfer, H.J., (1990) - Geochronological investigations in the Ossa-Morena Zona, SW Spain. PhD Thesis, *ETH Zürich*, 1-153.
- Srivastava, R.M. (2005) Probabilistic Modeling of Ore Lens Geometry: An alternative to Deterministic Wireframes. *Mathematical Geology*, 37 (5)
- Soares, A., (1993) - Geostatistical Estimation of Multi-Phase Structures, *Mathematical Geology*, 24 (2), 149-160.
- Soares, A., (2006) - Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente, *IST press*, 206 p.
- Susini, S., Donatis, M., (2009) – 3D model of a sector of the South Scotia Ridge (Antarctica). *Computers & Geosciences*, 35, pp83-91.
- Tonini, A., Guastaldi, E., Massa, G., Conti, P., (2008) – 3D geo-mapping based on the surface data for preliminary study of underground Works: a case study in Val Topina (Central Italy). *Engineering Geology*.
- Tonini, A., Guastaldi, E., Meccheri, M., (2009) – Three-dimensional reconstruction of the Carrara Syncline (Apuan Alps, Italy): An approach to reconstruct and control a geological model using only field survey data. *Computers & Geosciences*, 35, pp33-48.
- Touray, J.C., Marcoux, E., Hubert, P., Proust, D., (1989) - Hydrothermal processes and ore-forming fluids in the Le Bourneix gold-deposit, Central France. *Econ.Geol*, 84, pp 1328-1339.

- Veslud, C.C., Cunney, M., Lorilleux, G., Royer, J.J., Jébrak, M., (2007) – 3D modeling of uranium-bearing solution-collapse breccias in Proterozoic sandstones (Athabasca Basin, Canada) – Metallogenic interpretations. *Computer & Geosciences*, 35, pp 92-107.
- Zanchi, A., Francesca, S., Stefano, Z., Simone, S., Garziano, G., (2009) – 3D reconstruction of complex geological bodies: examples from the Alps. *Computers & Geosciences*, 35, pp49-69.