

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Ciências**  
**ULisboa**

**Rochas Virtuais de Lisboa – Contributo para a sua divulgação  
utilizando  
Modelação 3D e Fotogrametria**

João Artur Pires Gil

**Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica – Tecnologias e Aplicações**

Trabalho de Projecto orientado por:  
Prof. Dra. Paula Redweik



## Agradecimentos

Como tudo na vida, nada se faz sozinho, por isso gostaria de agradecer ao conjunto de pessoas que ao longo deste mestrado de alguma maneira contribuíram para este resultado.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Prof. Dra Paula Redweik que me propôs este projecto, que juntou duas áreas de grande interesse para mim (Geologia e SIG que eu sempre tentei conciliar desde que comecei este Mestrado) e também pelo tempo que sempre dispensou para me orientar com o maior rigor ao longo do semestre. Sem os seus conhecimentos este projecto não teria sido possível.

Em segundo gostaria de agradecer à Prof. Dra. Cristina Catita, primeiro por ter sido quem me apresentou o mestrado e depois por todo o apoio e conselhos ao longo do ano e meio que durou este mestrado.

Gostaria também de agradecer à Prof. Dra. Ana Navarro e ao Prof. Dr. Mário Cachão, a primeira pelo apoio que me deu com os seus conhecimentos sobre a classificação automática de imagens e ao segundo por todas as ideias com que contribuiu para este projecto, pelas amostras amavelmente disponibilizadas e pelos conhecimentos geológicos que enriqueceram este projecto.

Aos meus pais deixo um grande agradecimento por tudo o que sempre me deram na vida, mas principalmente por fazerem de mim a pessoa que sou e que espero que os orgulhe.

Aos meus colegas de mestrado, Alexandre, Emanuel e Fábio agradeço por terem feito deste mestrado uma melhor experiência e pela amizade que espero que dure.

Gostaria também de agradecer especialmente à Marlene por todo o apoio que me dá todos os dias, pela motivação e pela força, por nunca me deixar desistir e por todo o amor, por estar cá sempre e ainda por me ajudar sempre com o meu maravilhoso português.

Por fim gostaria de agradecer à minha avó, que já não se encontra entre nós, mas que sempre me deu todo o apoio e que sei que gostaria de me ver feliz.

Este projeto não foi escrito com base no Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990 por opção do autor.

## Resumo

O objectivo de divulgação da geologia da região de Lisboa através da criação de modelos 3D de amostras geológicas implicava a escolha destas mesmas amostras. Na primeira fase foram estudadas as 4 folhas da Carta Geológica de Portugal que foram escolhidas para este projecto: a 34-A, 34-B, 34-C e 34-D. O estudo destas cartas permitiu conhecer melhor toda a história geológica da região de Lisboa o que por sua vez ajudou à escolha das amostras geológicas que se pretendiam modelar. As amostras foram escolhidas com base na sua importância para a geodiversidade regional e pela sua disponibilidade imediata para o começo do projecto.

Ao mesmo tempo que se realizava este estudo, foi descarregado o modelo digital de terreno (MDT) produzido pela missão SRTM da NASA para utilizar como modelo de elevação no mapa 3D, feito a partir do *software CityEngine*. As folhas da carta geológica foram editadas (redução da resolução) para servirem de textura sobre o MDT. Foram também vectorizadas, para que pudessem servir para identificar, as formações geológicas na textura do mapa 3D. A vectorização, feita a partir de duas metodologias concorrentes (vectorização interactiva em *ArcMap* e classificação automática assistida em *ENVI*) permitiu produzir *shapefiles* das formações geológicas. Estas *shapefiles*, juntamente com o ficheiro TIN do MDT, foram utilizadas para produzir uma *shapefile Multipatch*. Este ficheiro foi colocado como um modelo transparente sobre o mapa 3D e permite a identificação das formações geológicas sobre a textura.

Para a modelação 3D foi primeiro obtida a cobertura fotográfica de cada uma das amostras. Isto implicou a captura, numa plataforma rotativa, de pelo menos uma foto por cada 10° de rotação da amostra, para um total de 36 fotografias. No entanto foram sempre obtidas mais fotografias. Com a cobertura completa exportaram-se as fotografias para o computador e aqui elas foram importadas para o *software Pix4D*. Cada amostra foi dividida em pelo menos duas partes uma vez que uma só perspectiva sobre a amostra não a permitia cobrir a 100%. A partir das fotografias capturadas foram identificados pontos em comum em cada uma das partes da amostra. Estes pontos permitiram a união das partes. Com as partes unidas foi criada uma nuvem de pontos densa. Esta nuvem foi limpa de zonas que não pertenciam à amostra final. Finalmente foi criado o modelo 3D, a partir da nuvem de pontos densa e este foi exportado para um modelo OBJ. O processo foi repetido para cada uma das amostras.

Em *ArcMap* foi criada uma base de dados das amostras. Esta base de dados foi carregada no *CityEngine* e permitiu o carregamento de cada um dos modelos 3D previamente criados. Aos modelos 3D ficou associada a informação sobre as amostras, que havia sido colocada na base de dados.

Com todos os elementos na *scene* do *CityEngine*, este foi exportado para um ficheiro *Webscene* e foi carregado no *ArcGis Online*. Ficou criado o Mapa 3D. No *website* modelo.io foram também carregados os modelos 3D. A partir da plataforma wix.com foi criado um *website* de divulgação. Neste *website* foi colocado um visualizador do modelo 3D para cada uma das amostras. Cada amostra teve uma página individual com mais informações sobre o modelo e a amostra. A página principal do *website* permite escolher a amostra que o utilizador pretende visualizar e analisar interactivamente.

## Palavras-chave:

Geologia, Lisboa, Modelação 3D, Fotogrametria, *Pix4D*, *CityEngine*, *ArcGis Online*, *ENVI*

## Abstract

The goal of disseminating the geology in the Lisbon region through the creation of 3D models of geological samples implied the choice of those samples. In the first phase of the project the 4 sheets of the Geological Map of Portugal chosen for the project were studied: the sheets 34-A, 34-B, 34-C and 34-D. The study of the charts allowed to better know the geological history of the region of Lisbon and that in its turn helped to choose the geological samples that were intended to model. The samples were chosen for its importance for the regional geological diversity and by its immediate availability for the beginning of the project.

While this study was conducted, the digital terrain model (DTM) produced by the SRTM mission from NASA was downloaded to be used as a digital elevation model in the 3D map to be produced in CityEngine. The sheets of the Geological Map were edited (resolution reduction) to be used as the texture over the DTM. They were also vectorized so that they could serve to identify the geological layers in the texture of the 3D map. The vectorization made using two concurrent methodologies (interactive vectorization in ArcMap and automatic assisted classification in ENVI) allowed to produce the shapefiles of the geological layers. These shapefiles, together with the TIN file from the DTM, were used to produce a Multipatch shapefile. This file was placed in the 3D map, as a transparent model that allowed the identification of the geological layers over the texture.

For the 3D modelling, it was acquired first the photographic coverage of each of the samples. This implied the capture, in a rotating platform, of at least one photo for each 10° of rotation of the samples, for a total of 36 photographs. More photos were always obtained, however. With the coverage complete, the photographs were exported to the computer and here they were imported to the *software* Pix4D. Each sample was split in at least two parts since only one perspective couldn't cover 100% of the sample. Common points were measured in each part of the sample, starting from the photos. These points allowed the union of the parts. The dense point cloud was created with the parts united. This cloud was cleaned of zones that did not belong to the final sample. Finally, the 3D model was created, from the dense point cloud, and it was exported to an OBJ model. The process was then repeated for all the samples.

In ArcMap, a database of the samples was created. This database loaded to CityEngine allowed the loading of all the 3D models previously created. To the 3D models it got associated the information about the samples that was placed in the database.

With all the elements in the CityEngine scene, the Webscene file was exported and loaded to ArcGis Online. The 3D map was created.

The 3D models were loaded into the *modelo.io website*. The divulgation *website* was created from the platform *wix.com*. In this *website* it was placed a 3D model viewer for each of the samples. Each sample had an individual page with more information about the sample and the model. The main page of the *website* allows the user to pick the sample it wants to view and analyse it interactively

## Keywords:

Geology, Lisbon, 3D Modeling, Photogrammetry, Pix4D, CityEngine, ArcGis Online

## Índice

1	Introdução .....	1
1.1	Estrutura do Relatório .....	1
1.2	Enquadramento do projecto .....	2
1.3	Tecnologias utilizadas .....	5
1.4	Estado da arte .....	6
1.5	Enquadramento da área envolvida .....	9
1.6	Breve resumo da geologia da zona de Lisboa .....	10
1.6.1	Jurássico (201.3 Ma - $\approx$ 145 Ma) .....	10
1.6.2	Cretácico ( $\approx$ 145 Ma – 66.0 Ma) .....	11
1.6.3	Oligocénico (33.9 Ma – 23.03 Ma) .....	12
1.6.4	Miocénico (23.03 Ma – 5.333 Ma).....	13
2	Metodologias .....	15
2.1	Escolha das amostras geológicas a modelar .....	16
2.2	Preparação dos dados para a utilização no <i>CityEngine</i> .....	18
2.2.1	Modelo Digital de Terreno .....	18
2.2.2	Cartas Geológicas.....	18
2.3	Avaliação da metodologia: Vectorização interactiva vs. Classificação automática....	26
2.4	Problemas encontrados nas folhas das cartas geológicas .....	29
2.5	Aquisição da cobertura fotográfica para a produção dos modelos 3D .....	32
2.6	Criação dos modelos 3D .....	35
2.6.1	Carregamento da cobertura fotográfica e processamento inicial .....	35
2.6.2	Identificação de pontos em comum e optimização.....	36
2.6.3	União das partes e geração da nuvem de pontos .....	37
2.6.4	Limpeza do modelo e geração da textura.....	39
2.6.5	Exportação do modelo final .....	40
2.7	Avaliação da metodologia: Processo de criação dos modelos 3D .....	41
2.8	Criação da Base de dados de amostras .....	44
2.9	Criação do suporte Web para a divulgação .....	45
2.9.1	Mapa 3D.....	45
2.9.2	Website wix.com.....	49
3	Resultados .....	51
3.1	Vectorização e Classificação automática da Carta Geológica .....	51
3.2	Mapa 3D interactivo.....	54
3.3	<i>Website</i> de divulgação.....	58

4	Conclusão.....	62
5	Propostas de melhoria .....	65
6	Bibliografia .....	66
7	Anexos.....	69
7.1	Anexo 1 Tabela Cronoestratigráfica.....	69
7.2	Anexo 2 – Mapa final vetorizado interactivamente .....	70
7.3	Anexo 3 – Mapa final vetorizado por classificação assistida.....	71
7.4	Anexo 4 – Amostra 3D.cga .....	72
7.5	Anexo 5 – colunas.cga .....	72
7.6	Anexo 6 – gerar_modelo.cga .....	72
7.7	Anexo 7 – transparencia.cga .....	73
7.8	Anexo 8 – water.cga.....	73
7.9	Anexo 9 – Folha 34-A da Carta Geológica de Portugal.....	74
7.10	Anexo 10 – Folha 34-B da Carta Geológica de Portugal .....	75
7.11	Anexo 11 – Folha 34-C da Carta Geológica de Portugal .....	76
7.12	Anexo 12 – Folha 34-D da Carta Geológica de Portugal.....	77
7.13	Anexo 13 – Matriz de confusão da folha 34-A .....	78
7.14	Anexo 14 – Matriz de confusão da folha 34-B parte A.....	79
7.15	Anexo 15 – Matriz de confusão da folha 34-B parte B.....	80
7.16	Anexo 16 - Matriz de confusão da folha 34-B parte C.....	81
7.17	Anexo 17 - Matriz de confusão da folha 34-B parte D .....	82
7.18	Anexo 18 – Matriz de confusão da folha 34 – B parte E .....	83
7.19	Anexo 19 – Matriz de confusão da folha 34-C .....	84
7.20	Anexo 20 – Matriz de confusão da folha 34-D .....	85

## Índice de Ilustrações

FIGURA 1.1 ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE TRABALHO EM PORTUGAL CONTINENTAL .....	9
FIGURA 1.2 ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE TRABALHO NO DISTRITO DE LISBOA .....	9
FIGURA 1.3 ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE TRABALHO COM SOBREPOSIÇÃO DAS 4 FOLHAS UTILIZADAS DA CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL .....	9
FIGURA 2.1 ESQUEMA DE TRABALHO E OPERAÇÕES PARA O PROCESSAMENTO DO MODELO DIGITAL DE TERRENO EM ARCMAP PARA UTILIZAÇÃO NO CITYENGINE .....	18
FIGURA 2.2 ESQUEMA DE TRABALHO E OPERAÇÕES PARA A UTILIZAÇÃO DAS CARTAS GEOLÓGICAS COMO TEXTURA NO CITYENGINE .....	19
FIGURA 2.3 ESQUEMA DE TRABALHO E OPERAÇÕES PARA A CRIAÇÃO DO MAPA FINAL DE VECTORIZAÇÃO INTERACTIVA.....	21
FIGURA 2.4 ESQUEMA DE TRABALHO E OPERAÇÕES PARA CLASSIFICAÇÃO ASSISTIDA DAS FOLHAS DA CARTA GEOLÓGICA, DIVIDIDA POR 2 PRODUTOS DE SOFTWARE, ARCMAP E ENVI .....	24
FIGURA 2.5 FIGURA ILUSTRATIVA DAS DIVISÓRIAS NECESSÁRIAS CRIADAS NA FOLHA 34-B DA CARTA GEOLÓGICA PARA A SUA CLASSIFICAÇÃO .....	25
FIGURA 2.6 PORMENORES DA FOLHA 34-B DA CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL ONDE SE VERIFICA A PROXIMIDADE DE CORES ENTRE A CAMADA MIOCÉNICA ( $M^{4}_{VIIA}$ ) E A DO CRETÁCICO ( $C^{2}_{AC}$ ).....	29
FIGURA 2.7 PORMENORES DA FOLHA 34-B DA CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL ONDE SE VERIFICA A PROXIMIDADE DE CORES ENTRE A FORMAÇÃO DO JURÁSSICO ( $J^5$ ) E A FORMAÇÃO DE ALUVIÕES (A) .....	29
FIGURA 2.8 ESQUERDA - CONTACTO ENTRE A FOLHA 34-A E 34-B DA CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL ONDE SE VERIFICA O DESALINHAMENTO DA FORMAÇÃO ALUVIÃO (A). DIREITA - CONTACTO ENTRE A FOLHA 34-B E 34-D ONDE SE VERIFICA O DESAPARECIMENTO DA FORMAÇÃO DE ALUVIÕES (A) E TAMBÉM DE UMA FALHA. ....	30
FIGURA 2.9 CONTACTO ENTRE A FOLHA 34-A E 34-C DA CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL ONDE SE VERIFICA QUE A MESMA FORMAÇÃO EM DUAS FOLHAS DIFERENTES APRESENTA CORES DIFERENTES (CAMADAS $C^{2}_{AC}$ ) .....	30
FIGURA 2.10 ESQUEMA DE TRABALHO E OPERAÇÕES PARA A CRIAÇÃO DE UM MODELO MULTIPATCH PARA A IDENTIFICAÇÃO DAS FORMAÇÕES GEOLÓGICAS NO MAPA 3D .....	31
FIGURA 2.11 EXEMPLO DA COBERTURA FOTOGRÁFICA (EM ANÉIS) DE UMA NUVEM DE PONTOS COMPLETA .....	33
FIGURA 2.12 BASE ROTATIVA CIRCULAR UTILIZADA PARA CONSEGUIR A COBERTURA FOTOGRÁFICA DAS AMOSTRAS EM FIADAS CIRCULARES.....	33
FIGURA 2.13 PLATAFORMA CIRCULAR COM FUNDO NEGRO E FOCOS DE LUZ LIGADOS UTILIZADOS NA OBTENÇÃO DA COBERTURA FOTOGRÁFICA CIRCULAR DAS AMOSTRAS ....	34
FIGURA 2.14 ESQUEMA DE TRABALHO E OPERAÇÕES PARA A CRIAÇÃO DE MODELOS 3D A PARTIR DE AMOSTRAS GEOLÓGICAS.....	35
FIGURA 2.15 VISTA DO TIE POINT MANAGER DO SOFTWARE PIX4D COM A IDENTIFICAÇÃO DE UM TIE POINT NA PARTE A E B DO PROJECTO DO MODELO 3D DO ARENITO .....	36
FIGURA 2.16 MODELO 3D (PRÉ-PROCESSADO) COMPLETO COM OS TIE POINTS IDENTIFICADOS	37
FIGURA 2.17 SUPERFÍCIES DUPLICADAS NA NUVEM DE PONTOS POR PROBLEMAS NA UNIÃO DAS PARTES DOS MODELOS.....	38
FIGURA 2.18 NUVEM DE PONTOS DE UM MODELO COMPLETO COM ZONAS A LIMPAR EVIDENCIADAS (A VERMELHO).....	39

FIGURA 2.19 MODELO 3D COMPLETO DE CALCÁRIO DE LIÓS .....	40
FIGURA 2.20 MODELO 3D FINAL DO GRANITO COM ÁREA DESFOCADA REALÇADA A VERMELHO .....	41
FIGURA 2.21 MODELO 3D DO XISTO DO RAMALHÃO .....	42
FIGURA 2.22 REGRAS CGA PARA CRIAR UM MODELO E PARA CRIAR A TRANSPARÊNCIA DO MESMO. PERMITE AINDA A TRANSLAÇÃO DO MODELO 50 METROS NO EIXO Y .....	45
FIGURA 2.23 REGRA CGA PARA CARREGAR OS MODELOS 3D DAS AMOSTRAS GEOLÓGICAS A PARTIR DA INFORMAÇÃO PRESENTE NA BASE DE DADOS .....	46
FIGURA 2.24 REGRA CGA PARA A CRIAÇÃO DAS COLUNAS DE LIGAÇÃO DAS FORMAÇÕES GEOLÓGICAS AOS MODELOS, COM UMA ALTURA DE 1300 METROS .....	46
FIGURA 2.25 REGRA CGA PARA CRIAR A SUPERFÍCIE DA ÁGUA. AUTOR: CHR17180.....	47
FIGURA 2.26 ESQUEMA DE TRABALHO E OPERAÇÕES PARA A CRIAÇÃO DA SCENE FINAL DO MAPA 3D (ANTES DA SUA EXPORTAÇÃO) .....	48
FIGURA 2.27 ESQUEMA DA PÁGINA DE CADA MODELO DO WEBSITE CRIADO EM WIX.COM .....	49
FIGURA 2.28 ESQUEMA DA PÁGINA INICIAL DO WEBSITE CRIADO EM WIX.COM .....	50
FIGURA 3.1 MAPA FINAL VECTORIZADO INTERACTIVAMENTE COM DESTAQUE DAS FORMAÇÕES GEOLÓGICAS, FALHAS GEOLÓGICAS E COM A IDENTIFICAÇÃO DA CIDADE DE LISBOA. CAMADAS VECTORIZADAS COM BASE NAS FOLHAS 34-A, 34-B, 34-C E 34-D DA CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL À ESCALA 1:50000 .....	52
FIGURA 3.2 MAPA FINAL CLASSIFICADO COM RECURSO AO ALGORITMO DE MAXIMUM LIKELYHOOD COM DESTAQUE DAS FORMAÇÕES GEOLÓGICAS, FALHAS GEOLÓGICAS E COM A IDENTIFICAÇÃO DA CIDADE DE LISBOA. CAMADAS CRIADAS DA CLASSIFICAÇÃO DAS FOLHAS 34-A, 34-B, 34-C E 34-D DA CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL À ESCALA 1:50000 .....	53
FIGURA 3.3 MAPAS DA VECTORIZAÇÃO INTERACTIVA (ESQUERDA) E DA CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA ASSISTIDA (DIREITA) LADO A LADO PARA PERMITIR A COMPARAÇÃO DAS DUAS METODOLOGIAS .....	53
FIGURA 3.4 INFORMAÇÕES DA AMOSTRA GEOLÓGICA QUE SURGEM AO SELECIONAR O MODELO 3D CORRESPONDENTE NO MAPA 3D.....	54
FIGURA 3.5 INFORMAÇÃO SOBRE A CAMADA GEOLÓGICA QUE SURGE AO SELECIONAR UMA CAMADA GEOLÓGICA NA SUPERFÍCIE DO MAPA 3D .....	55
FIGURA 3.6 MODELOS 3D DO ARENITO (ESQUERDA) E BASALTO (DIREITA) NO MAPA 3D .....	55
FIGURA 3.7 MODELO 3D DO BIOCALCARENITO (ESQUERDA) E CALCARENITO (DIREITA) NO MAPA 3D.....	56
FIGURA 3.8 MODELOS 3D DO GABRO (ESQUERDA) E GRANITO DE SINTRA (DIREITA) NO MAPA 3D .....	56
FIGURA 3.9 MODELO 3D DO XISTO DO RAMALHÃO NO MAPA 3D.....	56
FIGURA 3.10 MODELOS 3D DO CALCÁRIO DE LIOS (ESQUERDA) E DO CALCÁRIO MARGOSO (DIREITA) NO MAPA 3D.....	57
FIGURA 3.11 VISTA WEB DO MAPA 3D .....	57
FIGURA 3.12 VISUALIZADOR DO MODELO 3D PRESENTE NO WEBSITE DE DIVULGAÇÃO. ASSINALADO A VERMELHO AS VISTAS PRÉ-DEFINIDAS SOBRE O MODELO 3D.....	58
FIGURA 3.13 LISTA DE AMOSTRAS GEOLÓGICAS QUE SURGE NA PÁGINA PRINCIPAL DO WEBSITE .....	59
FIGURA 3.14 INFORMAÇÕES SOBRE O PROJECTO QUE SURGEM IMEDIATAMENTE ABAIXO DA LISTA DE AMOSTRAS GEOLÓGICAS NO WEBSITE DE DIVULGAÇÃO .....	59
FIGURA 3.15 BARRA DE BOTÕES NO TOPO DO WEBSITE DE DIVULGAÇÃO .....	60

FIGURA 3.16 PÁGINA DO MAPA GEOLÓGICO CRIADO, UTILIZANDO AS FORMAÇÕES GEOLÓGICAS VETORIZADAS NO WEBSITE .....	60
FIGURA 3.17 MENU EM LISTA (DROPDOWN) DAS AMOSTRAS GEOLÓGICAS NO WEBSITE DE DIVULGAÇÃO .....	60
FIGURA 3.18 VISTAS DO UTILIZADOR DO WEBSITE DE DIVULGAÇÃO. PÁGINA PRINCIPAL (ESQUERDA); PÁGINA DE UM MODELO 3D (DIREITA) .....	61
FIGURA 7.1 TABELA CRONOESTRATIGRÁFICA UTILIZADA NA COMPONENTE GEOLÓGICA DO PROJECTO. VERSÃO 08/2018 VIGENTE A QUANDO DA ELABORAÇÃO DO PROJECTO .....	69
FIGURA 7.2 MAPA FINAL VETORIZADO INTERACTIVAMENTE COM DESTAQUE DAS FORMAÇÕES GEOLÓGICAS, FALHAS GEOLÓGICAS E COM A IDENTIFICAÇÃO DA CIDADE DE LISBOA (EXPANDIDO).....	70
FIGURA 7.3 MAPA FINAL CLASSIFICADO COM RECURSO AO ALGORITMO DE MAXIMUM LIKELYHOOD COM DESTAQUE DAS FORMAÇÕES GEOLÓGICAS, FALHAS GEOLÓGICAS E COM A IDENTIFICAÇÃO DA CIDADE DE LISBOA (EXPANDIDO) .....	71
FIGURA 7.4 FOLHA 34-A DA CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL À ESCALA 1:50000.....	74
FIGURA 7.5 FOLHA 34B DA CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL À ESCALA 1:50000 .....	75
FIGURA 7.6 FOLHA 34C DA CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL À ESCALA 1:50000 .....	76
FIGURA 7.7 FOLHA 34D DA CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL À ESCALA 1:50000 .....	77
FIGURA 7.8 MATRIZ DE CONFUSÃO DA CLASSIFICAÇÃO DA FOLHA 34-A .....	78
FIGURA 7.9 MATRIZ DE CONFUSÃO DA CLASSIFICAÇÃO DA FOLHA 34-B - PARTE A.....	79
FIGURA 7.10 MATRIZ DE CONFUSÃO DA CLASSIFICAÇÃO DA FOLHA 34-B- PARTE B .....	80
FIGURA 7.11 MATRIZ DE CONFUSÃO DA CLASSIFICAÇÃO DA FOLHA 34-B - PARTE C.....	81
FIGURA 7.12 MATRIZ DE CONFUSÃO DA CLASSIFICAÇÃO DA FOLHA 34-B - PARTE D.....	82
FIGURA 7.13 MATRIZ DE CONFUSÃO DA CLASSIFICAÇÃO DA FOLHA 34-B - PARTE E.....	83
FIGURA 7.14 MATRIZ DE CONFUSÃO DA CLASSIFICAÇÃO DA FOLHA 34-C.....	84
FIGURA 7.15 MATRIZ DE CONFUSÃO DA CLASSIFICAÇÃO DA FOLHA 34-D .....	85

## Índice de Tabelas

TABELA 2.1 ORIGEM E UTILIZAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS NO PROJECTO .....	16
TABELA 2.2 LISTAGEM DAS AMOSTRAS GEOLÓGICAS ESCOLHIDAS COM A SUA ERA E PERÍODO IDENTIFICADOS .....	16
TABELA 2.3 FORMAÇÕES CLASSIFICADAS EM CADA FOLHA DA CARTA GEOLÓGICA COM O NÚMERO DE POLÍGONOS DE TREINO (1ºVALOR) E POLÍGONOS DE TESTE (2º VALOR) .....	23
TABELA 2.4 FORMAÇÕES CLASSIFICADAS EM CADA PARTE DA FOLHA 34-B COM OS POLÍGONOS DE TREINO (1ºVALOR) E OS POLÍGONOS DE TESTE (2ºVALOR) .....	26
TABELA 2.5 RESUMO DOS VALORES DE EXATIDÃO, COEFICIENTE K E MAIORES ERROS DE COMISSÃO E OMISSÃO DE TODAS AS FOLHAS CLASSIFICADAS .....	27
TABELA 2.6 PARÂMETROS UTILIZADOS NA CÂMARA FOTOGRÁFICA UTILIZADA NA OBTENÇÃO DA COBERTURA FOTOGRÁFICA DAS AMOSTRAS GEOLÓGICAS .....	32

## **Glossário de termos geológicos**

**Rochas Ígneas** – Rochas formadas pelo arrefecimento e solidificação de magma ou lava de forma mais ou menos rápida. O tempo e a zona de arrefecimento e solidificação da rocha fundida determinam a textura da mesma. Por outro lado, a rocha pré-existente e a zona de formação determinam a composição química da nova rocha. As condições de arrefecimento podem levar a texturas que vão desde granular até à vítrea. Em termos composicionais o principal factor discriminatório destas rochas é a composição em sílica. Esta composição condiciona a mineralogia das rochas. Rochas pobres em sílica assumem normalmente um tom mais escuro enquanto que rochas mais ricas em sílica assumem tons mais claros. Exemplos de rochas ígneas são o Granito e o Gabro (formados em profundidade) enquanto que os seus equivalentes superficiais são o Riólito e o Basalto, respetivamente.

**Rochas Sedimentares** – Rochas resultantes de processos de deposição, cimentação e posterior diagénese (alteração da rocha em condições de temperatura e/ou pressão elevadas, mas menos elevadas que as do metamorfismo) de partículas (sedimentos) minerais e/ou originários de processos orgânicos. As partículas minerais derivam da alteração e erosão de outras rochas que são posteriormente transportadas para as zonas de bacias de acumulação. As partículas orgânicas podem ser resultado da deposição de esqueletos carbonatados ou partículas originárias da atividade de seres vivos. Os sedimentos depositados passam então por processos diagenéticos que dão origem às rochas sedimentares. Exemplos de rochas sedimentares são argilitos, arenitos, calcários ou carvão e hidrocarbonetos. No caso dos arenitos e calcários existem vários elementos intermédios que permitem extrapolar a evolução das condições de formação da rocha (por exemplo avanços ou recuos da linha de costa).

**Rochas Metamórficas** – Rochas resultantes da transformação de rochas pré-existentes por exposição a condições de temperatura e/ou pressão muito superiores aos processos diagenéticos sedimentares, que geram alterações químicas e físicas profundas. A exposição a estas condições pode resultar da movimentação das rochas para as profundezas da terra por vários processos tectónicos. Existem ainda rochas formadas pela exposição a condições de alta pressão em vários ambientes. A intrusão de rocha a grandes temperaturas na crosta pode também levar a que as temperaturas envolventes atinjam as condições de metamorfismo. Xistos e mármore são exemplos de rochas metamórficas. As rochas originais destes dois exemplos são argilitos e calcários, respetivamente.

**Falhas** – Fraturas/descontinuidades num maciço rochoso resultante da deformação frágil das rochas onde esta está situada. A deformação das rochas/maciço rochoso é derivada do acumular de tensões na rocha. As tensões estão normalmente associadas a zonas de fronteira de placas tectónicas. Quando a tensão acumulada nas rochas é libertada, sob a forma de movimento rápido em falhas ativas é gerada a grande maioria dos sismos.

**Cavalgamento** – Tipo de falha particular em que uma rocha mais antiga é colocada sobre uma rocha mais recente. Esta falha contraria um dos princípios básicos da geologia: o princípio da sobreposição de camadas - o qual dita que numa sequência de rochas não perturbada, uma camada é mais recente que aquela que se situa sob si e mais antiga que a que se situa sobre si.

**Sequência Depositional** – Unidade estratigráfica de uma sucessão de estratos geneticamente relacionados e limitada por discordâncias na base e no topo.

**Transgressão Marinha** – Evolução da linha de costa para o interior dos continentes. Ao existir uma transgressão as áreas continentais são inundadas. A análise de um depósito geológico de uma transgressão mostra que rochas associadas a um determinado ambiente sedimentar marinho são normalmente sobrepostas por rochas de um ambiente sedimentar marinho mais profundo, ou seja, as rochas mais recentes vão corresponder a ambientes marinhos mais profundos.

**Regressão Marinha** – Evolução da linha de costa para zonas antes ocupadas pelo mar, revelando extensões do anterior fundo marinho. A análise do registo geológico de uma regressão caracteriza-se por rochas associadas a um ambiente sedimentar mais profundo sobrepostas por rochas de um ambiente sedimentar menos profundo, ou seja, as rochas mais recentes correspondem a ambientes menos profundos.

# 1 Introdução

## 1.1 Estrutura do Relatório

O relatório deste projecto encontra-se dividido em 8 capítulos, cujos conteúdos são descritos abaixo.

No primeiro capítulo, são descritas as motivações para a construção deste projecto; são resumidas as tecnologias computacionais que foram adoptadas para conseguir os produtos finais; são apresentados projectos semelhantes a este, já existentes, bem como projectos que utilizaram o *Pix4D* na área da geologia. É ainda comparado este projecto com os seus semelhantes; apresenta-se o enquadramento geográfico em que o projeto se insere e por fim resume-se a geologia da zona abrangente deste projecto.

Nas metodologias, são primeiro descritos os produtos de *software* utilizados durante o projecto e o seu contributo para o projecto final; de seguida, são resumidos os dados utilizados, bem como as suas fontes; finalmente, são descritos pormenorizadamente os passos da metodologia criada. Estes são: escolha das amostras a modelar, preparação dos dados para o *CityEngine*, aquisição da cobertura fotográfica para os modelos, criação dos modelos 3D, criação da base de dados de amostras e por fim a criação do suporte web para a divulgação. No fim da preparação dos dados para o *CityEngine*, são discutidas as diferenças nas metodologias de criação das *shapefiles* das formações geológicas e também os problemas que foram encontrados nas folhas da Carta Geológica utilizada. Após a criação dos modelos 3D, discutiu-se também o processo de criação dos mesmos.

No capítulo dos resultados, são apresentadas as duas propostas de vectorização criadas e ainda o *website* de divulgação e o mapa 3D criado em *CityEngine*.

A conclusão permite a discussão final de todo projecto, ou seja, abordam-se as problemáticas levantadas na introdução sobre a divulgação geológica, seguidamente, discutem-se as metodologias utilizadas e os seus resultados, benefícios e problemas. No final deste capítulo, defende-se a capacidade de expansão deste projecto.

As propostas de melhoria permitem a apresentação de aspectos a melhorar encontrados durante o projecto e ainda ideias discutidas com vários intervenientes que podem ser incluídas em futuras iterações deste mesmo projecto.

Os anexos incluem a tabela cronostratigráfica seguida, os mapas de formações geológicas digitais (vectorizadas e classificadas automaticamente), as regras CGA utilizadas, imagens das folhas da carta geológica de Portugal utilizadas e por fim as matrizes de confusão de cada processo de classificação automática das folhas da Carta Geológica.

## 1.2 Enquadramento do projecto

É importante referir, inicialmente, que este projecto foi criado dentro da temática de Sistemas de Informação Geográfica, mas tem uma forte componente geológica. Por este motivo e para que o trabalho seja o mais esclarecedor possível, criou-se um pequeno glossário (disponível no início deste relatório) onde se apresentaram os termos geológicos que ajudam a compreender alguns temas referidos ao longo do projecto.

Na região de Lisboa existe uma grande geodiversidade com rochas numa gama de idades que se estende desde há aproximadamente 157 milhões de anos (como as rochas jurássicas de Sintra e do norte de Lisboa) até a rochas criadas por processos recentes (aluviões do Quaternário, encontrados nas margens do rio Tejo e seus afluentes).

No entanto, a população em geral não conhece a grande geodiversidade que se esconde em Lisboa. O conhecimento da geologia de um local é importante tanto para a cultura geral da população como para a cultura científica. Além da cultura geral e científica, os recursos geológicos tiveram, têm e continuarão a ter um importante impacto económico para as regiões. Para Lisboa este impacto foi incrementado pelos inúmeros monumentos contruídos na cidade em que foram utilizados os recursos geológicos das zonas envolventes.

Torna-se, por isso, importante uma divulgação mais vasta da geodiversidade de Lisboa, tarefa que ganha visibilidade e abrangência recorrendo às novas tecnologias disponíveis, nomeadamente a nível informático (*software e hardware*).

Uma tecnologia que tem ganho notoriedade é a criação de modelos 3D a partir de objectos reais, quer seja para impressão 3D, quer para a interacção num computador. Os modelos 3D são, a seguir ao objecto real, a melhor alternativa para a exposição dos mais variados objectos. Em relação aos reais, os objectos 3D têm a vantagem de que o público pode interagir com eles fisicamente (se estes forem impressos) ou num computador. Na verdade, os modelos 3D são, muitas vezes, a melhor maneira para que o público possa interagir com os objectos, uma vez que estes são únicos e num descuido podem ser irremediavelmente destruídos. Um modelo 3D num computador tem ainda a vantagem de se poderem utilizar outros recursos informáticos para fornecer mais informações sobre o modelo.

O *software* necessário para produzir modelos 3D tem-se tornado cada vez mais acessível a leigos na matéria. A existência de câmaras digitais e de *smartphones* com cada vez mais qualidade tem vindo a facilitar o processo de criação destes modelos. No entanto a criação de modelos 3D de rochas como se pretende neste projecto, é uma área ainda pouco explorada. Na área da arqueologia e também na paleontologia existem já colecções 3D de objectos disponíveis online. Estas colecções são cópias de objectos reais que estão normalmente guardados em armazéns. Estas incluem uma colecção do *Smithsonian National Museum of Natural History*<sup>1</sup> que resulta da tentativa deste museu de digitalizar toda a sua colecção de 155 milhões de artefactos e espécimes. Existe também uma colecção de fósseis do *British Geological Survey*<sup>2</sup>. Além destes exemplos, desde há algum tempo que modeladores têm também utilizado técnicas com *scanners* 3D para criar objectos virtuais ainda mais sofisticados (Paor, 2016) como a reconstrução virtual de vasos cerâmicos provenientes de escavações arqueológicas por Cohen et al. (2010).

---

<sup>1</sup> <https://3d.si.edu/about>

<sup>2</sup> <http://www.3d-fossils.ac.uk/>

Matildes (2016), para o estudo de movimentos de vertentes, recorreu a várias técnicas, que lhe permitiram reconstruir em modelos 3D várias vertentes. Uma das técnicas mais interessantes aqui utilizadas foi a recolha de um pequeno vídeo, com uma câmara de ação, a partir de um voo de um parapente, recorrendo depois a um script que permitiu extrair *frames* onde se visualizasse a vertente em estudo. A partir destes *frames*, foram testados vários programas para construir o modelo 3D da vertente.

Apesar de já existirem variadas aplicações de uso de modelação 3D e fotogrametria na geologia, estas ainda estão centradas na pesquisa científica. Para a divulgação científica existem ainda lacunas apesar do grande esforço por parte de alguns geólogos para alterar esta situação.

Com o intuito de contribuir para o preenchimento desta lacuna na divulgação científica da geologia, foi objectivo deste projecto explorar as potencialidades das novas tecnologias de modelação 3D, aplicadas em ciências geoespaciais, para a geração de produtos geológicos apelativos. Assim, foram construídos modelos 3D de amostras geológicas reais, da região de Lisboa. Estes modelos foram então implementados em dois produtos finais diferentes, um mapa 3D e um *website*.

Para escolher as amostras que foram utilizadas neste projecto foi necessário estudar a geologia presente nas cartas geológicas utilizadas.

Foi definido que seriam utilizadas amostras que representassem a geodiversidade da região e também que estivessem imediatamente disponíveis para o processo de modelação. Com estes critérios escolheram-se 9 amostras que serão pormenorizadas em 2.1.

Um mapa topográfico é ilustrativo e explica muito de uma região. No entanto nem todas as pessoas sabem interpretar este tipo de mapas uma vez que se representa em 2D informação 3D. Um mapa 3D com representação da altimetria é de mais fácil interpretação uma vez que elimina este problema.

Poucas pessoas fora da comunidade das ciências da Terra têm contacto com mapas geológicos. Estes mapas apresentam o mesmo problema dos topográficos que é que poucas pessoas sabem ler e interpretar estes mapas. Mas no caso destes mapas a solução não é tão simples como colocar informação escrita em 2D em 3D de novo. Neste caso entra a criação dos modelos 3D.

As amostras geológicas refletem a geologia do local onde são colhidas. O local de recolha das amostras é representado por uma camada, com uma cor específica no mapa geológico. Com as amostras de um local é possível representar a geologia presente no mapa geológico. A melhor maneira de representar as amostras digitalmente será com a construção de modelos 3D destas mesmas amostras.

A conjugação do mapa de altimetria com as folhas da carta geológica (mapa geológico) cria a base do mapa 3D que foi criado no âmbito deste projecto. Em conjunto, este mapa representa a morfologia do terreno visível em 3D (que permite a sua fácil interpretação). Ao colocar os modelos 3D sobre a zona de recolha das amostras é possível também visualizar e interpretar a geologia do local. Por fim, para que os modelos possam ser visualizados com todo o detalhe é necessária uma plataforma onde os modelos possam estar alojados e onde possa existir uma maior interacção por parte dos utilizadores. Este é o objectivo do *website* de divulgação.

Os dois produtos (mapa 3D e *website*) são úteis, tanto para a divulgação da geologia como para uma possível utilização em âmbito educativo. O objectivo principal deste projecto foi criar uma plataforma de divulgação nova para a geologia com recurso à fotogrametria e à modelação 3D. O público-alvo da divulgação será de todas as idades, que em princípio não terão grande conhecimento geológico. Por isso, tanto no mapa 3D, como no *website* de divulgação tentou-se que a linguagem fosse o mais simples possível, para que qualquer pessoa possa compreender e ficar mais instruído.

Seria interessante a utilização desta plataforma também em âmbito escolar. No entanto para esse tipo de utilização levanta-se outro tipo de constrangimentos. O maior constrangimento seria a idade alvo dos estudantes a que seria dirigido. Os conceitos abordados tanto no mapa 3D como no *website* podem ser demasiado complexos para alunos muito novos a iniciar o estudo das ciências da Terra, mas para alunos mais velhos, com mais conhecimentos, serão já adequados. O *website* traz ainda uma vantagem para o ensino da geologia: a interactividade com os próprios modelos 3D. Em vez de aprender sobre as rochas conceptualmente, os alunos podem explorar de maneira interactiva os modelos das rochas, mesmo que a escola não possua coleções de amostras geológicas físicas.

A proposta de divulgação que irá ser apresentada ao longo deste relatório é mais uma contribuição para a divulgação das ciências da Terra, mas pretende demonstrar que existem métodos que tornam esta ciência mais atrativa para o público em geral. A criação dos modelos 3D das amostras reais e a sua colocação em plataformas *online* permite chegar a mais público que se espera que se possa vir a interessar por esta ciência no futuro. É de notar, também, que sem termos verdadeira consciência, a nossa observação e interpretação de rochas em amostra de mão, é feita em 3D. Por este facto, a identificação e ilustração de amostras de rochas a partir de fotos 2D não é, na maioria dos casos, adequada.

Sendo assim, as inovações resultantes deste projecto foram a utilização do *CityEngine* para a produção do mapa geológico, a colocação dos modelos 3D sobre o mapa 3D, a interactividade das formações geológicas (conseguida através da criação de uma *shapefile multipatch* importada para o *CityEngine*) e a utilização do ENVI para produzir as formações geológicas.

### 1.3 Tecnologias utilizadas

Para criar os modelos foram escolhidas duas técnicas complementares para se construírem modelos 3D de amostras geológicas: fotogrametria e modelação 3D.

A primeira destas técnicas, a fotogrametria, é a técnica de obter as coordenadas 3D de um ponto real através das coordenadas captadas em pelo menos um par de fotografias do objecto em que o ponto se encontra (onde as medidas são bidimensionais). Esta técnica é de grande importância, pois é a partir destas medidas que os objectos 3D podem ser criados. Complementarmente a esta técnica foi também utilizada uma técnica de modelação 3D que reconstrói superfícies a partir de um conjunto de pontos tridimensionais (nuvem de pontos)

Estas duas técnicas surgem em conjunto no *software Pix4D* (Pix4D, 2019), cujo funcionamento será descrito detalhadamente no capítulo da metodologia.

O *Pix4D* possui os algoritmos necessários para que a cobertura fotográfica de cada amostra possa ser convertida num modelo 3D completo.

Os modelos 3D das amostras geológicas são o principal objecto de divulgação do projecto, sendo os principais veículos de divulgação um mapa 3D interactivo, representativo da geologia e geomorfologia de Lisboa, e um *website* com exploração dinâmica.

Ao longo do projecto surgiu ainda a necessidade de vectorizar as formações geológicas presentes nas folhas da carta geológica utilizada. Para esta tarefa foram testadas duas soluções e para cada uma foi criada uma metodologia. A primeira solução foi a vectorização interactiva das formações geológicas, directamente a partir das folhas da carta em formato digital. A segunda foi a utilização de um algoritmo de classificação assistida de imagem, normalmente utilizado para a classificação de imagens de satélite e outros produtos fruto de técnicas de detecção remota.

Por fim ambas as metodologias foram comparadas de modo a avaliar qual seria a mais adequada para a vectorização das formações geológicas tanto em cartas geológicas de maior como de menor escala.

O mapa 3D foi desenvolvido a partir do *software CityEngine* (CityEngine, 2019) e o *website* criado na plataforma *Wix.com*. Esta plataforma é baseada na nuvem (*cloud*) e permite a criação de *websites* sem serem necessários conhecimentos de programação *web*.

## 1.4 Estado da arte

Para este projecto foram analisados outros projectos, com objectivos semelhantes, desenvolvidos com recurso ao *software Pix4D*, que é a base do projecto, e ainda projectos desenvolvidos cuja principal vertente tenha sido a criação de uma base de dados de objectos 3D, que podem ser geológicos ou não.

Como já se encontra referido no capítulo da introdução do projecto, existem coleções de objectos 3D no *Smithsonian National Museum of Natural History*. Esta colecção faz parte do esforço deste museu em digitalizar toda a sua colecção, como parte do *3D Program* do *Smithsonian Institution's Digitization Program Office*<sup>3</sup>. Este projecto, ao contrário do que foi desenvolvido neste projecto de tese, é feito através de equipamento de scannerização 3D.

Além do *Smithsonian* outras instituições como a NASA<sup>4</sup> possuem significativas coleções de objectos 3D. No caso da NASA os modelos são destinados à impressão 3D. O conteúdo dos modelos neste caso é das mais variadas missões da NASA e inclui modelos de sondas, planetas e outros corpos celestes. O *Smithsonian* tem ainda uma colaboração com o *National Park Service*<sup>5</sup> dos Estados Unidos da América para construir modelos 3D de alguns objectos geológicos dos parques nacionais para a sua preservação.

Dentro da área da geologia existem vários exemplos de utilização de técnicas de fotogrametria aplicadas nos mais variados campos. Um destes exemplos é descrito por Car et al. (2016) e consiste numa metodologia para mapear vertentes onde houve deslizamentos de terras através de imagens captadas por drones de baixo valor. As imagens geradas pela câmara do drone são então carregadas no *Pix4D* onde é possível gerar modelos 3D das vertentes após o deslizamento.

Ainda na área geológica, Tannant (2015) descreve e compara uma série de técnicas baseadas em fotogrametria para avaliar a perigosidade de faces rochosas. Neste artigo descreve-se como as técnicas de fotogrametria eram inicialmente comparadas com métodos tradicionais de avaliação de maciços rochosos. Actualmente, com a evolução do *software* que aplica este tipo de algoritmos, os métodos utilizando fotogrametria são aceites na área dos estudos geotécnicos de maciços rochosos.

Roncella et al. (2004) testa uma metodologia em que recorre a um conjunto de fotografias para modelar em 3D uma face rochosa com o intuito de calcular rigorosamente a direção e orientação de fracturas na rocha e na própria face rochosa. *No entanto*, é admitido que esta metodologia carece de mais experiência, uma vez que a sua aplicação universal não era ainda garantida.

Guerin et al. (2015) discute a problemática do mapeamento de vertentes quase verticais em zonas íngremes (como por exemplo, os Alpes) e dos contactos geológicos aqui presentes. Neste artigo é apresentada uma alternativa para este mapeamento, que consiste na criação de um modelo 3D da zona a mapear. *No entanto*, o problema apresentado não é completamente resolvido, uma vez que a textura que se pretendia utilizar, uma imagem de muito alta resolução, não é suportada pelo *software* utilizado. Com este problema o mapeamento dos contactos não é feito com a resolução pretendida no modelo.

Em Franceschi et al. (2015) é mapeada uma zona inacessível de um afloramento rochoso na zona sul dos Alpes. São combinados dados de LiDAR com técnicas de fotogrametria para produzir um modelo 3D detalhado.

---

<sup>3</sup> <https://3d.si.edu/>

<sup>4</sup> <https://nasa3d.arc.nasa.gov/models>

<sup>5</sup> <https://www.nps.gov/subjects/geohazards/photogrammetry.htm>

A partir deste modelo foi possível corrigir os limites de um mapa geológico produzido anteriormente. Este modelo, juntamente com o mapa geológico permitiu a produção de cortes da estrutura geológica da zona modelada.

Por fim, em termos de aplicações na geologia, temos Bistacchi et al. (2015) que propõe uma metodologia para estudar os processos de dolomitização (conversão de minerais de calcite (constituente do calcário) em minerais de dolomite) através do mapeamento e reconstrução 3D de afloramentos rochosos. Estes modelos permitiram o estudo do afloramento e a proposta de um novo modelo para as causas da dolomitização dos calcários da zona.

Encontra-se na literatura alguns casos de aplicação de metodologias para a criação de modelos 3D de amostras geológicas. Embora com fins diferentes, todas representam propostas interessantes para a divulgação e propagação do conhecimento geológico, pelo que serão analisados de seguida alguns exemplos.

O primeiro exemplo é proposto por Squelch (2018) onde se demonstra uma metodologia para a impressão 3D de modelos de amostras geológicas. Neste artigo descreve-se como a proliferação de cada vez mais câmaras de cada vez maior qualidade permite que se captem fotografias de boa qualidade para a utilização em modelos 3D. Referem também a existência de *software* como AutoDesk Remake que tiram partido destas fotografias para produzirem os modelos. Para desenvolver estes modelos é utilizado o algoritmo *Structure from motion*. No entanto, refere-se também que os modelos conseguidos por estas metodologias são normalmente superfícies abertas que necessitam de ser espessadas para servirem para impressão. No caso de superfícies fechadas, a impressão pode ser directa.

Um segundo artigo por Paor (2016) refere várias técnicas e metodologias existentes, até a data da publicação, para a criação de modelos 3D:

- O primeiro exemplo referido neste artigo é um modelo simples criado a partir da projecção de duas fotos (textura) sobre um modelo paralelepípedo simples. Este processo adequa-se à criação de modelos 3D de amostras com superfícies polidas.
- O segundo exemplo utiliza uma técnica semelhante ao primeiro, mas é aplicável em formas cilíndricas, que representam amostras retiradas de sondagens verticais.
- O último exemplo refere como utilizando *softwares* com algoritmos *Structure from motion* é possível reconstruir, com um pequeno conjunto de fotografias, amostras geológicas em modelos 3D.

Um projecto semelhante ao presente, o AusGeol library<sup>6</sup> foi desenvolvido pela Universidade da Tasmânia com financiamento do governo australiano. Este projecto foca-se na produção de modelos 3D através de fotografia digital, imagens captadas por drones ou outras plataformas. Entre os modelos disponibilizados no projecto destacam-se numerosos modelos 3D de amostras de rochas e ainda alguns afloramentos rochosos.

Para mostrar a localização geográfica dos modelos o projecto recorreu a uma biblioteca de JavaScript denominada *Leaflet*<sup>7</sup>. Esta aplicação permite desenvolver um mapa interactivo para colocar a localização geográfica das amostras. Ao clicar na localização geográfica de cada amostra irá surgir uma breve descrição da amostra e/ou afloramento.

Este projecto foi o mais semelhante ao das “Rochas Virtuais de Lisboa” encontrado. Por esta razão segue-se uma comparação sucinta dos dois.

---

<sup>6</sup> <http://www.ausgeol.org/>

<sup>7</sup> <https://leafletjs.com/>

A primeira grande diferença entre os projectos será o âmbito do projecto. O projecto do “AusGeol” foi desenvolvido para a partilha dos modelos por toda a comunidade científica e estudantil e para a preservação das rochas após a sua destruição e/ou erosão. Dentro deste âmbito outra diferença é que qualquer pessoa interessada pode fazer download de qualquer modelo para a utilização pessoal ou educacional. Por fim é também interessante notar o espírito colaborativo do projecto, em que outros geocientistas são convidados a colaborar. Além de mais geocientistas existe ainda a colaboração de várias outras universidades e organizações australianas.

Embora as “Rochas Virtuais de Lisboa” se encontrem no início do desenvolvimento e tenham um baixo número de amostras, o seu potencial para crescimento futuro é significativo. Apesar de a plataforma não ser tão colaborativa, este relatório contém instruções detalhadas para a construção dos modelos 3D. Uma pessoa sem experiência poderá seguir este guia para criar o seu próprio modelo de uma amostra geológica.

O mapa 3D criado tem funções semelhantes ao do projecto do [ausgeol.org](http://ausgeol.org), mas a informação geológica oferecida tem um nível de dificuldade que é mais adequado para estudantes mais avançados (universitários). O projecto “Rochas Virtuais de Lisboa” foi pensado para ser uma plataforma de divulgação para toda a comunidade (científica ou não).

Por fim, a grande vantagem que as “Rochas Virtuais” possuem, em relação ao [ausgeol.org](http://ausgeol.org) é o *website* onde é possível visualizar interactivamente os modelos. Apesar de o *website* do [ausgeol.org](http://ausgeol.org) também possuir esta função, o *website* das “Rochas Virtuais de Lisboa” foi criado para servir como visualizador interactivo e é otimizado tanto para computador, como para telemóvel, ao contrário do *website* do [ausgeol.org](http://ausgeol.org).

## 1.5 Enquadramento da área envolvida

A área em estudo, no âmbito deste projecto corresponde à área coberta pelas folhas 34-A, 34-B, 34-C e 34-D da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000. Esta área abrange o distrito de Lisboa e a zona norte do distrito de Setúbal numa extensão de 64 x 40km<sup>2</sup>. Na figura 1.1 é visível o enquadramento da área em estudo no contexto de Portugal Continental. Já na figura 1.2 encontra-se o enquadramento em relação ao distrito de Lisboa e ao de Setúbal (a sul). Na figura 1.3 é possível verificar que a área em estudo não ocupa a totalidade da área abrangida pelas 4 folhas da carta geológica utilizada. Esta situação justificou-se, pois, as zonas retiradas não possuem amostras relevantes que pudessem ser utilizadas neste projecto.

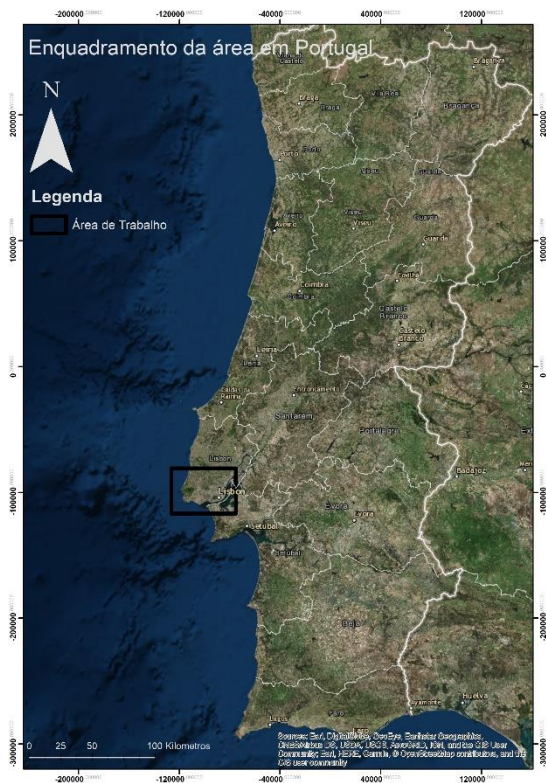


Figura 1.1 Enquadramento da área de trabalho em Portugal continental

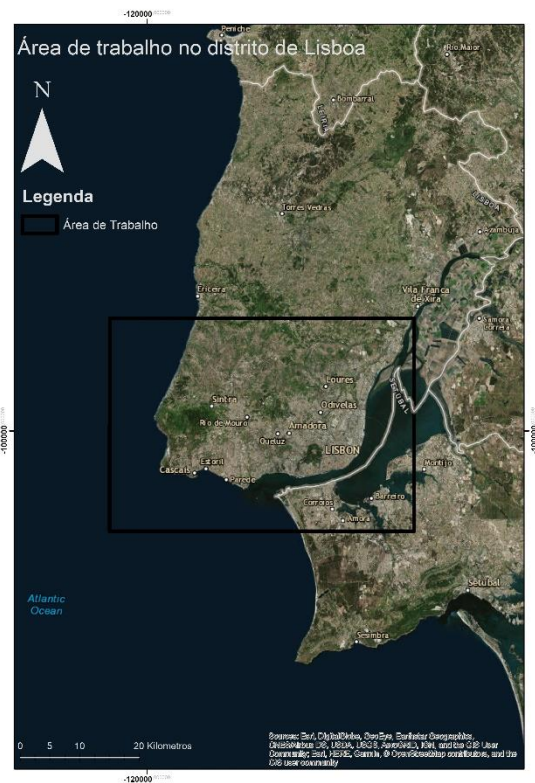


Figura 1.2 Enquadramento da área de trabalho no distrito de Lisboa

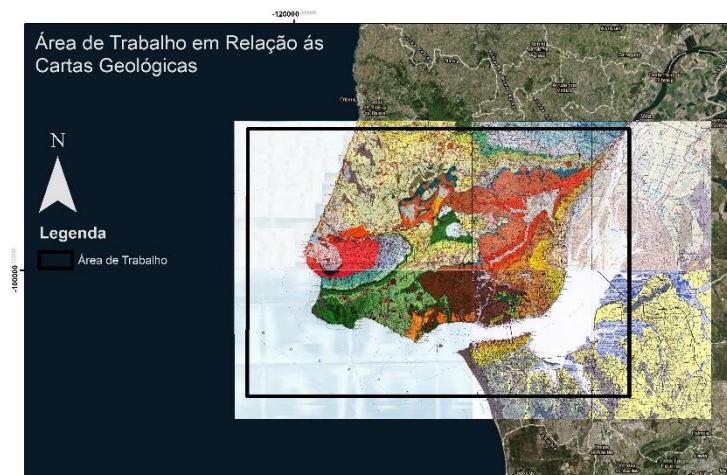


Figura 1.3 Enquadramento da área de trabalho com sobreposição das 4 folhas utilizadas da Carta Geológica de Portugal

## 1.6 Breve resumo da geologia da zona de Lisboa

Antes de se poder realizar a escolha das amostras geológicas foi necessário verificar a geodiversidade da zona e compilar um resumo das várias litologias.

Para realizar o estudo foram escolhidos dois critérios para separar os diferentes tipos de rochas existentes. Estes critérios foram a idade da rocha (Era/Período) e a classificação litológica da rocha (Calcário, Arenito, Granito, etc.)

Na zona em estudo encontram-se formações do Jurássico Superior ( $\approx 157.3$  Ma) até formações quaternárias, com poucos milhares de anos.

Algumas formações são encontradas em mais do que uma folha, das 4 utilizadas. No entanto, outras só aparecem numa folha específica (e por consequência numa região específica) pelo que serão identificadas as folhas onde é encontrada cada formação.

Uma análise prévia das cartas geológicas em estudo mostra que a época mais abrangida é o Cretácico. Esta abrangência é notória a nível geográfico (extensão) e a nível de diversidade litológica. O Miocénico é a época que apresenta mais formações distintas, principalmente na área do Concelho de Lisboa.

O resumo da geologia de Lisboa que se segue é feito com recurso à descrição efectuada nas notícias explicativas das folhas 34-A de Ramalho et al. (1993), 34-B de L.Rebêlo et al. (2011), 34-C de Ramalho et al. (2001) e 34-D de Pais et al. (2006) da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000.

A tabela cronostratigráfica (Cohen et al. (2018)) presente no Anexo 1 seguida foi a versão 2018/08 disponibilizada pela *International Commission on Stratigraphy*<sup>8</sup>.

### 1.6.1 Jurássico (201.3 Ma - $\approx 145$ Ma)

As formações identificadas do período jurássico encontram-se representadas nas cartas 34-A, 34-B e 34-C. As formações com esta idade nas cartas 34-A e 34-C são iguais uma vez que existe uma estrutura geológica (Serra de Sintra), que se estende por ambas as cartas e influencia o afloramento das formações na região. A maioria das rochas presentes nesta região, com esta idade, são consideradas rochas sedimentares.

As formações mais representativas desta idade são, de uma maneira geral, identificadas como calcários, margas e arenitos, alternando entre si em algumas formações. Os calcários mais compactos podem ser bioedificados, com presença de conteúdo fóssil.

No contacto com as rochas ígneas do Complexo Eruptivo de Sintra existem duas formações mais exóticas pois apresentam um nível de metamorfismo mais elevado. Estas estão presentes nas folhas 34-A e 34-C. Estas formações têm o nome de Calcários de São Pedro e Xistos do Ramalhão. Os Calcários de São Pedro ( $J^3_b$ ) correspondem a níveis de calcário cristalino metamorfozado em mármore branco a cinzento azulado, com níveis margosos já xistificados. Os Xistos do Ramalhão ( $J^{3-4}$ ) são alternâncias de níveis de calcário compacto e fino com níveis argilosos com aparência xistificada.

---

<sup>8</sup> [www.stratigraphy.org](http://www.stratigraphy.org)

Na carta 34-C existe ainda uma formação, os Calcários de Mem Martins ( $J^{4-5}$ ), que também apresenta algum metamorfismo. Neste caso, a formação é constituída por calcários margosos xistosos.

A carta 34-B apresenta formações distintas das presentes na zona de Sintra/Cascais, mas que também correspondem a calcários, arenitos e margas em alternâncias. As margas podem ter menor ou maior conteúdo argiloso.

## 1.6.2 Cretácico ( $\approx 145$ Ma – 66.0 Ma)

As formações de idade cretácica são as com maior representatividade na maioria das quatro cartas, pelo que são as que também apresentam a maior diversidade de formações. As formações classificadas como rochas sedimentares são as mais abundantes, mas existem também duas formações ígneas de grande importância: o Maciço Eruptivo de Sintra e o Complexo Vulcânico de Lisboa (CVL).

### 1.6.2.1 Rochas Sedimentares

Na folha 34-A correspondente à zona de Sintra, existem unidades que representam grande parte das idades do Cretácico Inferior, desde o Berriasiano até ao Albiano. Existem ainda unidades que correspondem à base do Cretácico Superior (Cenomaniano). Estas correspondem, no Berriasiano ( $C^1_{BE}$  – Topo da formação de Farta Pão) a Calcários e margas com conteúdo fóssil; no Valanginiano ( $C^1_V$  – Formação de Serradão e Formação da Guia) a calcários, margas e arenitos; no Hauteriviano inferior ( $C^1_{Ht}$  – Formação de Maceira) a Margas e Calcários com conteúdo fóssil; no Hauteriviano ( $C^1_{Hc}$ ) existe a formação Calcários com Rudistas da Praia dos Coxos; o Hauteriviano Superior ( $C^1_{Hba}$  – Formação do Cabo Raso e Formação de Guincho) corresponde a uma unidade de Calcários recifais inferiores; no Barremiano ( $C^1_{Ba}$  – Formação de Regatão) superior existe a formação dos Grés de Almargem inferiores (Arenitos, argilas e dolomitos); no Aptiano Inferior ( $C^1_A$  – Formação de Crismina) existem calcários e margas com conteúdo fóssil; o Aptiano Superior ( $C^1_{AS}$  – Formação de Rodízio) corresponde aos Grés de Almargem Superior (arenitos e argilas) (estas últimas três unidades correspondem às chamadas “Camadas de Almargem”); do Albiano ao Cenomaniano Médio ( $C^2_{AC}$  – Formação de Galé) existem várias formações sucessivas, correspondentes a calcários e margas (e níveis de grés); por fim no Cenomaniano Superior ( $C^3_C$ ) existe uma formação de calcários com rudistas e outro conteúdo fóssil. A folha 34-C contém em grande parte as mesmas formações que a carta 34-A, apesar dos afloramentos presentes poderem permitir uma mais detalhada descrição das mesmas.

A folha 34-B correspondente à zona de Loures engloba formações que apresentam equivalência lateral com as formações presentes nas cartas 34-A e 34-C.

A primeira unidade correspondente ao Hauteriviano inferior e corresponde a arenitos e argilas com níveis de calcários raros ( $C^1_{BeH}$ ). Esta unidade apresenta a mesma idade que a Formação da Maceira da carta 34-A. A unidade seguinte encontrada, encontra-se também presente na zona de Sintra e corresponde a uma formação de calcários e margas ( $C^1_{Hba}$ ) com idade correspondente do Hauteriviano Superior ao Barremiano inferior. As “Camadas de Almargem” ( $C^1_{BaA}$ ) encontram-se representadas nesta carta, mas apenas numa unidade correspondente a Arenitos com raras intercalações calcárias. Nas cartas 34-A e 34-C estas camadas subdividem-se em três formações distintas. Na quarta unidade existem calcários e margas ( $C^2_{AC}$ ) de idade correspondentes do Albiano ao Cenomaniano Médio e que correspondem à Formação da Galé.

Por fim existe uma unidade do Cenomaniano Superior ( $C^3_C$ ) correspondente a calcários com rudistas e outro conteúdo fóssil que existe também na carta 34-A.

Por fim na carta 34-D, que corresponde aproximadamente ao concelho de Lisboa, existem duas formações do Cretácico, a Formação de Caneças ( $C^2_{CN}$ ) e a Formação de Bica ( $C^3_{Bi}$ ).

A Formação de Caneças corresponde a calcários com rudistas que nas cartas 34-A e 34-C corresponde à unidade de calcários e Margas ( $C^2_{AC}$ ). A Formação de Bica corresponde à unidade de Calcários com Rudistas ( $C^3_C$ ).

#### 1.6.2.2 Rochas Ígneas

Como já se encontra referido existem duas ocorrências diferentes de rochas ígneas, na região ocupada pelas 4 cartas geológicas. Estas ocorrências correspondem ao Maciço eruptivo de Sintra, que se concentra nas cartas 34-A e 34-C e ao Complexo Vulcânico de Lisboa, do qual se encontram vestígios em todas as cartas.

O Maciço Eruptivo de Sintra constitui o acidente geológico e geomorfológico de maior importância da península de Lisboa (Teixeira, 1962 citado por Ramalho, et al., (1993)). O Maciço instalou-se provavelmente no Cretácico. Em termos de geodiversidade, o Maciço possui três tipos diferentes de rochas principais, em volume de rocha. Estes são os Granitos ( $\gamma$ ), com 79.2 +/- 0.8 Ma, os Sienitos ( $\sigma$ ), com 80.1 +/- 1.0 Ma e os Dioritos e Gabros ( $\tau$ ) com 83.4 +/- 0.7 Ma.

O Complexo Vulcânico de Lisboa instalou-se também entre o final do Cretácico e o início do Paleogénico. O magmatismo que formou o complexo encontra-se associado à abertura do Atlântico Norte e ocupa uma extensão de aproximadamente 200km<sup>2</sup> na região abrangida pelas 4 folhas da Carta Geológica utilizada. As estruturas associadas ao complexo são diversas (chaminés, escoadas, diques, etc.). A principal rocha associada ao complexo é o Basalto ( $\beta$ ), apesar de existirem várias outras como riólitos ou até gabros.

#### 1.6.3 Oligocénico (33.9 Ma – 23.03 Ma)

No final do Cretácico existe, nesta região, uma lacuna na sequência estratigráfica até este período. O intervalo de idades entre o Cretácico e o Oligocénico não se encontra então representado na sequência estratigráfica na região abrangida pelas folhas da Carta Geológica utilizadas.

No Oligocénico existe apenas uma unidade que aflora de maneira mais ou menos extensa em todas as cartas geológicas presentes. Esta unidade é a Formação de Benfica ( $\emptyset$ ). A carta 34-C de Cascais é onde esta formação se apresenta menos representada.

De uma maneira geral esta unidade é considerada heterogénea, pois apresenta várias litologias e é de maneira geral constituída por depósitos continentais. Esta formação assenta em discordância sobre o Complexo Vulcânico de Lisboa.

Na zona de Sintra esta unidade é constituída por arenitos e conglomerados com cimento margoso com intercalações de níveis argilosos e calcários. No entanto, noutras regiões de Lisboa e Loures existe alguma variação, principalmente dos detritos que constituem a unidade, devido às diversas fontes que existiram.

#### 1.6.4 Miocénico (23.03 Ma – 5.333 Ma)

O Miocénico na região abrangida pelas folhas encontra-se concentrado na zona do concelho de Lisboa e na área imediatamente a Norte e a Oeste. Existem ainda afloramentos na região de Cascais e na região do Sabugo (Sintra).

No Sabugo (Carta 34-A) existem duas unidades, os calcários lacustres com conteúdo fóssil ( $M^3I$ ) e os calcários e argilas com conteúdo fóssil. A primeira unidade corresponde à idade Langhiana. A segunda unidade corresponde a uma idade entre o Serravaliano e o Tortoniano.

Nas restantes cartas (34-B, 34-C e 34-D) a primeira unidade do Miocénico a aflorar é a unidade designada por Argilas dos Prazeres ( $M^1_I$  ou  $M_{PR}$ ). Esta unidade corresponde ao Aquitaniano ou ao Burdigaliano inferior. Corresponde a argilas e margas de lagunas litorais.

No Burdigaliano são identificadas várias unidades. Estas estão separadas pelas várias sequências deposicionais. A primeira sequência corresponde à unidade das Areolas da Estefânia ( $M_{Es}$  ou  $M^1_{II}$ ). Esta é constituída por areias finas e areias argilosas e argilitos. No topo, esta unidade passa a biocalcarenitos.

Seguidamente, encontra-se a segunda sequência deposicional que é constituída pelas seguintes unidades: Calcários de Entrecampos ( $M_{Ec}$  ou  $M_{III}$ ), um biocalcarenito com uma fração detrítica abundante e com fragmentos de moluscos que aflora na região de Lisboa e também na margem esquerda do rio Tejo e ainda na zona de Cascais, mas aqui aflora como calcários amarelos com conteúdo fóssil; as Argilas de Forno do Tijolo ( $M_{FT}$  ou  $M_{IVb}$ ) correspondem a areias finas argilosas com moluscos; a unidade das Areias de Quinta do Bacalhau ( $M_{QB}$  ou  $M_{IVb}$ ), que é constituída por areias arcósicas fluviais, com bancadas de argilitos e depósitos de planícies de inundação.

A terceira sequência deposicional desta idade contém duas unidades, os Calcários de Casal Vistoso ( $M_{CV}$  ou  $M_{Va1}$ ) e as Areias com *Placuna miocénica* ( $M_{Pm}$  ou  $M_{Va2}$ ). A primeira destas unidades é uma rocha carbonatada, gresosa, rica em moluscos e algas rodólitas.

A segunda unidade é representada por areias amarelas fluviais com seixos rolados e argilas arenosas. No Langhiano existem duas unidades descritas em Lisboa, os Calcários de Musgueira ( $M_{Mu}$  ou  $M_{Va3}$ ) e as Areias do Vale de Chelas ( $M_{VC}$  ou  $M_{Vb}$ ). Ambas as unidades pertencem à mesma sequência deposicional. A primeira unidade, os Calcários de Musgueira são um biocalcarenito branco, arenoso rico em moluscos e com algas rodólitas. As Areias de Vale de Chelas são areias feldspáticas, fluviais, pouco cimentadas e com estratificação cruzada.

Durante o Langhiano superior e Serravaliano existiram duas sequências deposicionais. A primeira compreende as unidades dos Calcários de Quinta das Conchas ( $M_{QC}$  ou  $M_{Vc}$ ), os Arenitos e calcarenitos de Pinhal e Castelo de Palmela ( $M_{Pl}$ ) e as Argilas azuis de Xabregas ( $M_{Xa}$  ou  $M_{Via}$ ). Os Calcários de Quinta das Conchas são biocalcarenitos grosseiros com concentrações de valvas de ostras. Os Arenitos de Pinhal e Castelo de Palmela apenas surgem em Setúbal e são arenitos compactos com seixos de quartzo e quartzito. Por fim, as Argilas azuis de Xabregas correspondem aos sedimentos de ambientes mais profundos do neogénico e são conjuntos silto-argilosos com areias finas de cor cinzenta azulada. A segunda sequência tem a unidade dos Grés dos Grilos ( $M_{Gr}$  ou  $M_{Vib}$ ). Esta compreende biocalcarenitos amarelados com fragmentos rolados de moluscos seguido de arenitos grosseiros.

As últimas idades, do Miocénico, presentes em Lisboa pertencem ao Serravaliano terminal e Tortoniano inferior. Esta tem duas sequências deposicionais.

A primeira sequência compreende as unidades dos Calcários de Marvila ( $M_{MV}$  ou  $M_{VIC}$ ), as Areias e margas de Quinta do Anjo ( $M_{QA}$ ), as Areolas do Braço de Prata ( $M_{BP}$  ou  $M_{VIIa}$ ). Os Calcários de Marvila são biocalcarenitos grosseiros e ricos em moluscos. As Areias e margas da Quinta do Anjo são biocalcarenitos e depósitos silto-margosos. As Areolas de Braço de Prata são alternâncias de arenitos finos, areias finas e calcários margosos e gresosos. A última sequência compreende as Areolas de Cabo RuiVO ( $M_{CR}$  ou  $M_{VIIb}$ ) que são areias finas e médias argilosas de cor amarelada escura e também arenitos.

## 2 Metodologias

Neste tópico serão descritas as metodologias utilizadas para a elaboração dos produtos finais. Os seguintes produtos de *software* foram utilizados no projecto:

- **ArcMap 10.6.1** – Componente do *ArcGis* da ESRI que permite a criação, manipulação, edição e análise de informação geoespacial. Este *software* foi importante na gestão dos dados georreferenciados que foram utilizados pois estes necessitavam sempre de algum tipo de tratamento ou transformação. Por fim, também os dados provenientes da vectorização foram tratados com base neste *software* (ArcMap, 2019).
- **ArcCatalog 10.6.1** – Componente do *ArcGis* da ESRI que permite a gestão e organização de informação geoespacial e também dos tipos de dados proprietários da ESRI. Ao longo deste projecto, este *software* permitiu a gestão dos vários dados recolhidos para o projecto e a sua manutenção dentro de bases de dados geográficas (ArcCatalog, 2018).
- **CityEngine 2018** – *Software* de modelação 3D da ESRI especializado na construção de modelos 3D urbanos. No caso deste projecto o *CityEngine* permitiu a criação do mapa geológico/morfológico 3D e a sua exportação para um formato *Webscene* que permitiu a sua publicação na *web* (CityEngine, 2019).
- **ENVI 5.3** – *Software* que permite o processamento e análise de imagens geoespaciais, nomeadamente imagens de satélite. Neste caso, foram utilizadas as capacidades de classificação assistida de imagens para realizar a vectorização das camadas da carta geológica (ENVI, 2019).
- **Pix4D mapper** – componente da suite de *software* Pix4D que permite a utilização de algoritmos de fotogrametria para a produção de modelos 3D através de uma cobertura fotográfica. Para este projecto o *software* foi utilizado para converter a cobertura fotográfica das amostras geológicas em modelos 3D das mesmas (Pix4D, 2019).

Na tabela 2.1 encontram-se listados os dados recolhidos, a sua proveniência e também a sua utilização nos produtos finais.

Tabela 2.1 Origem e utilização dos dados utilizados no projecto

<b>Dados</b>	<b>Proveniência</b>	<b>Mapa 3D</b>	<b>Website</b>
<b>Modelo Digital de Terreno<sup>9</sup></b>	SRTM – mosaico N38W09 N38W10	x	-
<b>Folhas 34-A, 34-B, 34-C e 34-D da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000</b>	Fornecidas pelo Prof. Doutor Mário Cachão	x	-
<b>Amostras geológicas</b>	Fornecidas pelo Prof. Doutor Mário Cachão	x	-
<b>Cobertura fotográfica das amostras</b>	Adquirida durante o projecto	-	x
<b>Modelos 3D</b>	Criados durante o projecto	x	x
<b>Formações geológicas vectorizadas</b>	Criadas durante o projecto	x	x

## 2.1 Escolha das amostras geológicas a modelar

As amostras a serem modeladas foram escolhidas tendo em conta, não só a sua disponibilidade imediata aquando do início do projecto, mas também a representatividade da geodiversidade da zona de Lisboa e a distribuição homogénea das amostras na área em estudo. Tendo em conta estes critérios utilizaram-se 9 amostras distintas, provenientes de diversas formações e idades geológicas. As amostras escolhidas são apresentadas na tabela 2.2.

Tabela 2.2 Listagem das amostras geológicas escolhidas com a sua Era e Período identificados

<b>Amostra</b>	<b>Era</b>	<b>Período</b>
<b>Arenito</b>	Mesozóico	Cretácico
<b>Basalto</b>	Mesozóico	Cretácico
<b>Biocalcarenito</b>	Cenozóico	Miocénico
<b>Calcarenito</b>	Cenozóico	Miocénico
<b>Calcário de Liós</b>	Mesozóico	Cretácico
<b>Calcário Margoso</b>	Mesozóico	Cretácico
<b>Granito</b>	Mesozóico	Cretácico
<b>Gabro</b>	Mesozóico	Cretácico
<b>Xisto do Ramalhão</b>	Mesozóico	Jurássico

<sup>9</sup> Dados para Portugal continental disponíveis em <http://www.fc.up.pt/pessoas/jagoncal/srtm/>

Como é possível verificar na tabela 2.2, 7 das 9 amostras pertencem ao Mesozóico e destas, 6 pertencem ao Cretácico. Isto deve-se ao facto de, como já referido anteriormente, esta era ser a mais representada nas cartas geológicas abrangidas.

O período Jurássico apenas está representado por uma amostra pois a escolhida apresenta características únicas na zona.

O período Oligocénico não se encontra representado no lote de amostras devido à natureza das rochas aflorantes desta idade. Estas são na sua maioria detríticas ou argilosas, o que leva a que a sua conservação seja difícil. Além deste problema, na colecção do Prof. Doutor Mário Cachão não existiam amostras já recolhidas aquando do início do processo de modelação. Existem afloramentos deste período na região de Lisboa, mas os mais representativos são de natureza detrítica ou argilosa (como já foi referido acima) e são materiais pouco consolidados. Esta situação dificulta o processo de modelação pelo que se optou por não utilizar amostras deste período.

Do período Miocénico foram escolhidas duas amostras que mostram as variações nas condições de formação que ocorreram.

Nota-se que este grupo de 9 amostras não mostra toda a geodiversidade de Lisboa dado que existem inúmeras litologias que poderiam ser escolhidas para a construção de modelos 3D. Pequenas variações nas condições de formação criam rochas únicas que poderiam estar aqui representadas, mas devido a condicionamentos temporais e de legibilidade do produto final optou-se por esta selecção. A razão de escolha de cada uma das amostras é de seguida apresentada:

- **Arenito, Calcário Margoso e Calcário Liós** – Estas três rochas juntas formam uma sequência de transgressão marinha. A rocha mais antiga desta sequência, o Arenito Silicioso, mostra uma rocha formada num ambiente mais próximo da costa, enquanto que a camada mais recente, o Calcário Liós demonstra um ambiente marcadamente marinho recifal.
- **Basalto** – Amostra do Complexo Vulcânico de Lisboa que demonstra a intensa atividade vulcânica que ocorreu no final da era Cretácica. Esta atividade levou à formação de escoadas extensas, das quais a rocha utilizada faz parte. Existem ainda outros tipos de rochas no complexo, mas o Basalto é de longe a mais abundante.
- **Granito e Gabro de Sintra** – A Serra de Sintra apresenta uma diversidade de rochas ígneas intrusivas que mostram o complexo processo de formação do maciço. O Granito e o Gabro são opostos em termos mineralógicos pois ambos são de maneira geral as rochas ígneas intrusivas com composições opostas em termos de quantidade total de sílica na amostra. Na serra de Sintra, o Gabro surge no seio do maciço granítico.
- **Calcarenito e Biocalcarenito** – São as rochas mais recentes da amostra que mostram a diversidade de ambiente de formação resultante das numerosas transgressões e regressões marinhas durante o período Miocénico. Ambas têm uma classificação semelhante, porém o tipo de material detrítico que compõe a matriz e alguns grãos bioclásticos são diferentes. Estas diferenças refletem ambientes marinhos de diferentes profundidades.
- **Xisto do Ramalhão** – É uma rocha de idade jurássica que passou por processos metamórficos resultantes da instalação do Maciço de Sintra. O interesse desta rocha passa pelo bandado claro e escuro resultante dos processos metamórficos. As rochas classificadas como Xisto do Ramalhão e ainda os Calcários de S. Pedro são rochas únicas na região de Lisboa devido aos processos metamórficos que as moldaram.

## 2.2 Preparação dos dados para a utilização no *CityEngine*

Para criar o mapa 3D, no *CityEngine*, vai ser necessário preparar inicialmente o modelo digital de terreno e ainda as cartas geológicas. As cartas geológicas foram vectorizadas com dois procedimentos separados que são descritos abaixo e serão posteriormente discutidos. Esta discussão inclui qual será o melhor procedimento a adotar futuramente para outros projectos semelhantes.

### 2.2.1 Modelo Digital de Terreno

Para o desenvolvimento de um mapa 3D no *software CityEngine* foi necessário adquirir e processar dados de altimetria para a criação de um Modelo Digital de Terreno. O mapa de altimetria foi obtido através dos dados disponibilizados online do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

Estes dados foram adquiridos através de uma missão STS-99 da NASA e foram compilados para Portugal Continental por José Alberto Gonçalves (FCUP). Os dados disponibilizados encontram-se divididos em mosaicos com lado de aproximadamente um grau. O sistema de coordenadas é o WGS84 e a resolução dos dados é de aproximadamente 30 metros (1 segundo de arco). Os mosaicos descarregados, correspondentes à área de Lisboa e Vale do Tejo foram o N38W09.hgt e N38W10.hgt.

O processamento dos dados em ambiente *ArcMap* desde o descarregamento dos dados até à sua utilização posterior em *CityEngine* encontra-se descrito no esquema seguinte da figura 2.1:

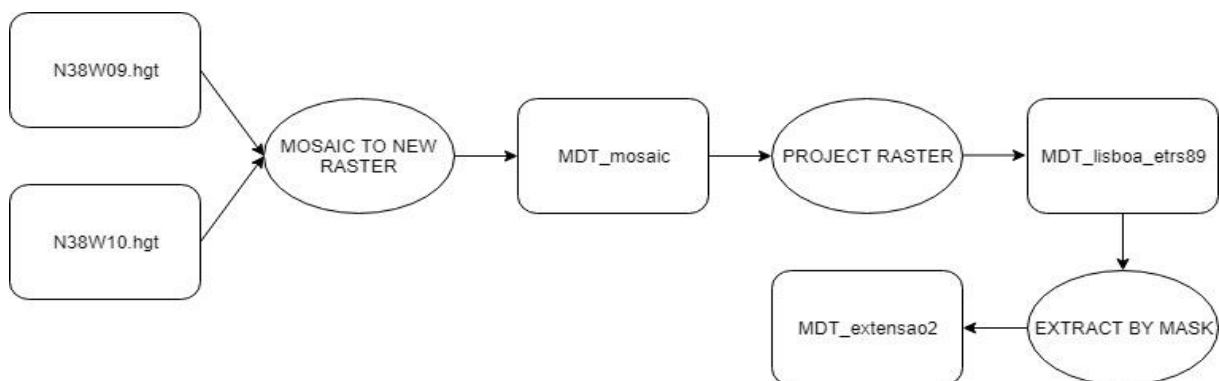


Figura 2.1 Esquema de trabalho e operações para o processamento do Modelo Digital de Terreno em *ArcMap* para utilização no *CityEngine*

Por fim, para que o mapa tivesse as características morfológicas bem evidenciadas foi utilizada a ferramenta *Raster Calculator* para sobrelevar 1,5 vezes o relevo do mapa.

### 2.2.2 Cartas Geológicas

As cartas geológicas utilizadas correspondem às folhas 34-A, 34-B, 34-C e 34-D da Carta Geológica de Portugal Continental à escala 1:50000 disponibilizadas pelo LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia) (Anexos 9 – 12). Estas cartas são digitalizações georreferenciadas no sistema de coordenadas Hayford Gauss Militares Datum de Lisboa e em formato Tiff. Para a utilização no *CityEngine* as folhas foram projectadas no sistema de coordenadas PT-TM06/ETRS89. Este sistema foi escolhido por ser o sistema de coordenadas de referência utilizado para a cartografia produzida em Portugal.

Estas foram utilizadas para dois fins: criar uma textura a ser utilizada por cima do modelo digital de terreno e criar uma camada do tipo *shapefile* que possa ser utilizada para identificar as formações presentes no mapa 3D. O esquema das operações de preparação das cartas geológicas encontra-se na figura 2.2. As utilizações das folhas finais encontram-se descritas nos tópicos seguintes.

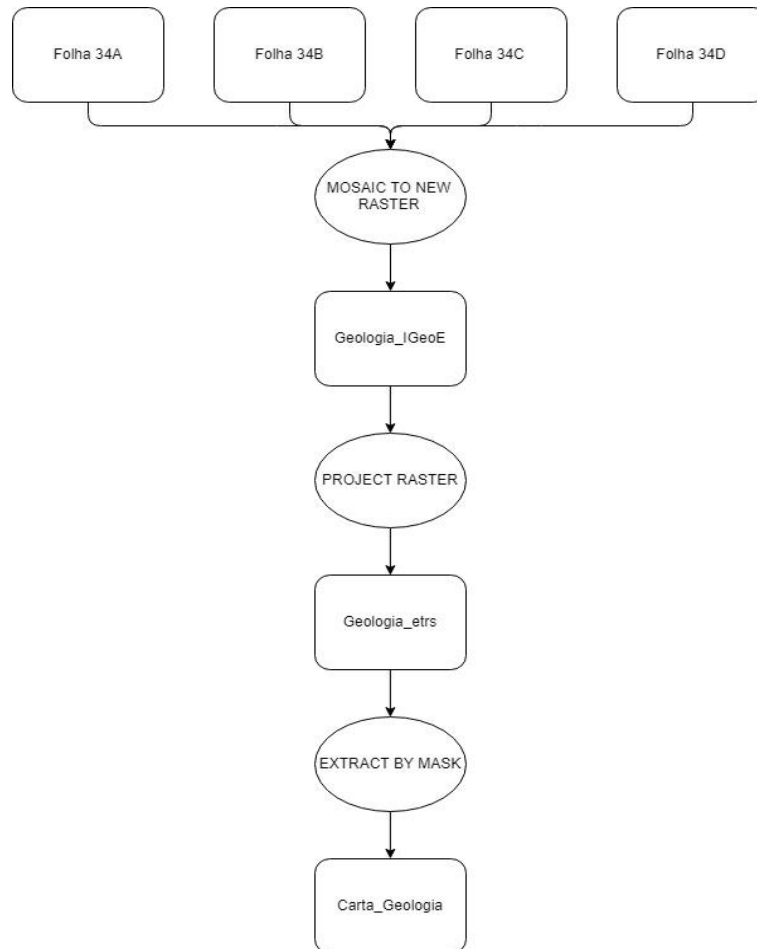


Figura 2.2 Esquema de trabalho e operações para a utilização das cartas geológicas como textura no CityEngine

### 2.2.2.1 Preparação das cartas para uso como textura

A primeira função das cartas geológicas no âmbito deste trabalho foi a sua utilização como textura a colocar sobre o modelo digital de terreno de modo a complementar a informação deste. Para esta utilização, o *raster* final obtido anteriormente foi novamente projetado com um *pixel* de maior dimensão (de tamanho inicial de 3,18 metros para 10 metros) de maneira a que a informação contida em cada pixel diminuísse assim como a resolução.

O objectivo desta operação foi a de diminuir o tamanho da *scene* que seria exportada mais tarde para obter o mapa 3D. Texturas de resolução muito elevada tornam difícil o carregamento e posterior manuseamento dos mapas 3D até nos computadores de maior capacidade de processamento.

### 2.2.2.2 Vectorização das formações geológicas com base nas cartas geológicas

A segunda função das cartas geológicas foi de servir de base para a vectorização das formações geológicas principais e ainda das falhas. A vectorização foi realizada para ser possível identificar interactivamente as formações geológicas no mapa 3D criado. Todo o processo foi efetuado a partir do *software ArcMap*. O primeiro passo da vectorização foi a criação de uma camada de informação correspondente a cada uma das categorias de falhas geológicas. As categorias das falhas criadas foram:

- Falhas certas
- Falhas prováveis
- Cavalgamentos certos
- Cavalgamentos prováveis

Após a vectorização de todas as falhas de cada uma das categorias, todas as camadas de informação correspondentes a cada um dos tipos de falhas foram juntas numa única camada. A separação entre as falhas é feita através do atributo “tipo”. Este atributo separa as falhas dentro da mesma camada de informação pelos nomes das categorias de falhas descritas acima.

Seguidamente, foi iniciada a vectorização dos limites das formações geológicas à superfície do terreno. Estas foram também divididas em diferentes categorias. A divisão foi baseada no período geológico. Secundariamente, algumas formações foram também divididas com base nas diferenças entre as várias unidades de uma mesma formação, se tal fosse relevante para as amostras presentes no projecto. Com base nestas regras foram criadas as seguintes categorias:

- Cretácico
- Miocénico
- Quaternário
- Jurássico Metamorfizado
- Jurássico Sedimentar
- Complexo de Benfica
- Complexo Vulcânico de Lisboa
- Granitos de Sintra
- Gabros e Sienitos de Sintra
- Água

No caso do Jurássico esta divisão deveu-se ao facto da formação possuir características mais sedimentares, na zona norte de Lisboa, sendo mais semelhante, à vista desarmada, com o Cretácico. O Jurássico metamorfizado junto à Serra de Sintra (do qual existe uma amostra) apresenta características únicas na região. Na serra de Sintra, embora todas as rochas ígneas pertençam ao mesmo período geológico, as amostras são muito distintas e evidenciam dois processos de formação distintos, pelo que foi considerada importante a diferenciação da formação (Granitos de Sintra e Sienitos e Gabros de Sintra). Para esta fase, cada formação geológica foi vectorizada numa camada de informação independente (semelhante ao processo realizado para as falhas geológicas). Quando uma camada geológica se encontrava limitada por uma falha, a falha foi utilizada para delinear o limite da camada de modo a garantir a máxima precisão possível no processo. No caso mais comum de limitação de uma camada por outra camada geológica, a delimitação da camada em vectorização foi feita seguindo os vértices do polígono já criado, de modo a garantir que não ficariam espaços entre as camadas.

As principais formações geológicas, isto é, todas as formações exceto o Quaternário, foram vectorizadas independentemente.

Após a conclusão do processo todas as camadas de informação foram juntas através de uma operação de junção (*Merge*). Cada camada é identificada pelo atributo “Formacao” na tabela de atributos.

Por fim, foi realizada a mesma operação para as zonas correspondentes ao rio Tejo e ao mar representados por polígonos.

Ao contrário de todas as outras formações, que se encontravam concentradas em grandes “manchas” ao longo do mapa, as zonas correspondentes ao Quaternário encontram-se dispersas ao longo da região. Para facilitar a vectorização de uma formação tão dispersa foi criada uma camada correspondente ao polígono completo da região utilizada. Deste polígono foram retiradas todas as outras camadas já vectorizadas incluindo as camadas de água (Tejo e Mar), numa operação de *Erase*. O resultante desta operação será a camada correspondente ao Quaternário, que poderá ser então unida com a restante geologia. O processo encontra-se descrito na figura 2.3:

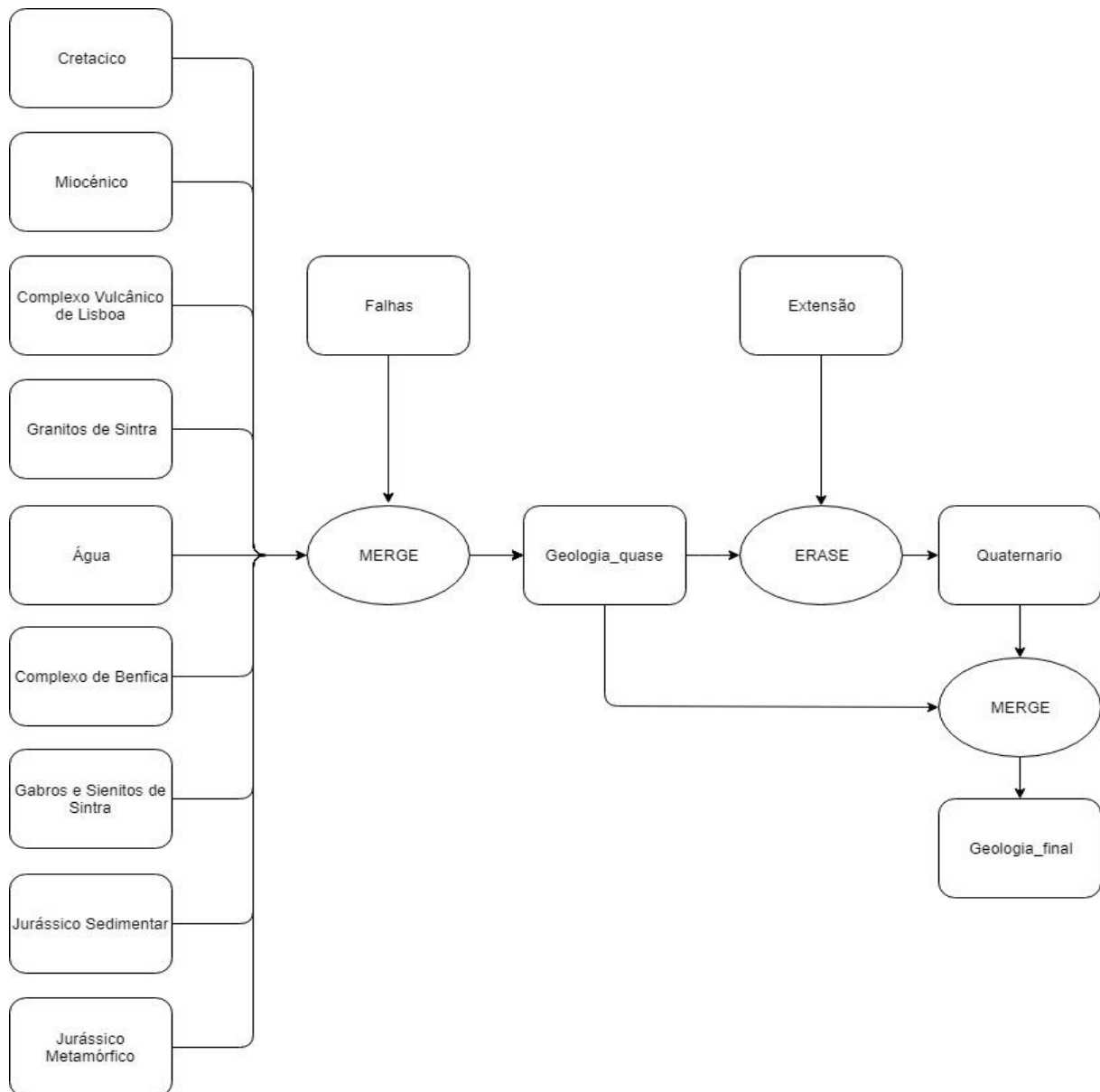


Figura 2.3 Esquema de trabalho e operações para a criação do mapa final de vectorização interactiva

O processo de vectorização de uma área de 1081 km<sup>2</sup> (área total vectorizada de acordo com o *ArcMap*) demorou aproximadamente 3 semanas. Este consumo de tempo é elevado e para uma área maior o tempo despendido será ainda maior o que poderá pôr em causa a viabilidade deste processo. Por isso, no próximo tópico descreve-se um processo alternativo mais rápido e potencialmente mais adequado a uma área maior ou a uma carta geológica com uma escala menor, ou seja, um mapa com menos detalhe, mas de área maior.

### 2.2.2.3 Técnica alternativa de vectorização das formações geológicas

Dada a morosidade da vectorização interactiva, procurou-se um método alternativo que pudesse resultar na individualização das formações geológicas desenhadas nas cartas. Visto estas estarem em formato digital e serem constituídas predominantemente por manchas de cor homogénea, pensou-se tentar conseguir as formações geológicas pela utilização de um algoritmo de classificação assistida de imagem. O algoritmo escolhido para este processo foi o Máxima Verosimilhança (*Maximum Likelihood*). Este algoritmo permite classificar os pixels de uma imagem digital calculando qual a probabilidade de cada pixel pertencer a uma determinada classe, com base em classes de treino previamente fornecidas. No caso pretendia-se que cada classe correspondesse a uma camada geológica.

Devido às particularidades deste algoritmo e a alguns problemas das cartas, não é possível classificar todas as folhas (4) de uma única vez. A principal razão para esse facto foi a mesma cor ter sido utilizada para representar camadas diferentes em cartas diferentes. Este problema pode ser explicado pelas várias datas em que as folhas da Carta Geológica de Portugal foram criadas. A mais recente é de 2008, enquanto que a mais antiga data de 1991. A explicação mais plausível para a discrepância será a que, nas diferentes datas em que se produziu uma folha da carta geológica, não foi utilizado um esquema de cores único e universal para cada camada.

Para realizar a classificação recorreu-se ao *software ENVI* que normalmente é utilizado para a classificação de imagens de satélite. Neste caso foi adaptado para a classificação de cartas geológicas. Uma vez que a classificação utilizada é assistida, é necessário criar polígonos de treino que permitam ao algoritmo saber como realizar a classificação.

A avaliação da exatidão da classificação foi efectuada recorrendo à geração de matrizes de confusão a partir, também, do *software ENVI*. Para a geração das matrizes foram criados polígonos de teste que correspondem a 30% do total de polígonos utilizados para cada classe (Treino + Teste).

O primeiro teste foi realizado com a folha 34-C da Carta Geológica em duas tentativas. Ambas as tentativas consideraram todas as classes que foram utilizadas na vectorização interactiva das formações geológicas. Na segunda tentativa foi ainda utilizada uma camada adicional correspondente às linhas de delimitação das formações geológicas e das suas unidades mais pormenorizadas que existem ao longo da Carta Geológica. Estas duas tentativas permitiram determinar qual a situação em que o erro de classificação seria menor e utilizar essas classes para as restantes cartas.

Foi constatado que a opção sem a camada correspondente às linhas apresenta a melhor exatidão de classificação na matriz de confusão, embora a diferença seja mínima. Dado isto, as restantes cartas viriam a ser classificadas com as formações geológicas presentes na tabela 2.3, mas sem a camada das linhas.

Este processo permitiu classificações com exatidões altas em todas as restantes folhas exceto na carta 34-B que corresponde à região a norte de Lisboa.

<b>Formação</b>	<b>34-A</b>	<b>34-B*</b>	<b>34-C</b>	<b>34-D</b>
<b>Água</b>	Sim (7+3)	-	Sim (7+3)	Sim (7+3)
<b>Complexo de Benfica</b>	-	-	Sim (10+5)	Sim (7+3)
<b>Complexo Vulcânico de Lisboa</b>	Sim (17+8)	-	Sim (10+5)	Sim (14+6)
<b>Cretácico</b>	Sim (21+9)	-	Sim (21+9)	Sim (14+6)
<b>Granito</b>	Sim (10+5)	-	Sim (14+6)	-
<b>Filões</b>	Sim (7+3)	-	Sim (7+3)	-
<b>Jurássico com Metamorfismo</b>	Sim (14+6)	-	-	-
<b>Jurássico Sedimentar</b>	-	-	Sim (14+6)	-
<b>Miocénico</b>	Sim (10+5)	-	Sim (7+3)	Sim (14+6)
<b>Quaternário</b>	Sim (7+3)	-	Sim (7+3)	Sim (21+9)
<b>Sienito</b>	Sim (7+3)	-	Sim (14+6)	-

Tabela 2.3 Formações classificadas em cada folha da carta geológica com o número de polígonos de treino (1º valor) e polígonos de teste (2º valor)

A qualidade da classificação será detalhada e discutida nos capítulos seguintes. Após todas as classificações serem efectuadas procedeu-se à sua exportação em ficheiros *shapefile* que possam ser lidos em *ArcMap*. Para este procedimento são também utilizadas as ferramentas do *ENVI*. O procedimento completo para classificação das folhas encontra-se na figura 2.4.

As camadas são então abertas em *ArcMap* onde deve ser agora efectuada uma limpeza generalizada de todas as formações geológicas individualmente. Esta operação inclui a remoção de áreas classificadas erradamente. A limpeza foi feita em *ArcMap* com as ferramentas de edição de camadas (*Editor*). Por fim todas as camadas devem ser juntas de novo utilizando a ferramenta *Merge*.

Este procedimento funcionou para a generalidade das folhas (34-A, 34-C e 34-D). Todavia este não funciona, como já foi referido, com a folha 34-B. O tópico seguinte explica o processo modificado de classificação desta folha, que foi adotado e servirá para outras cartas com problemas semelhantes.

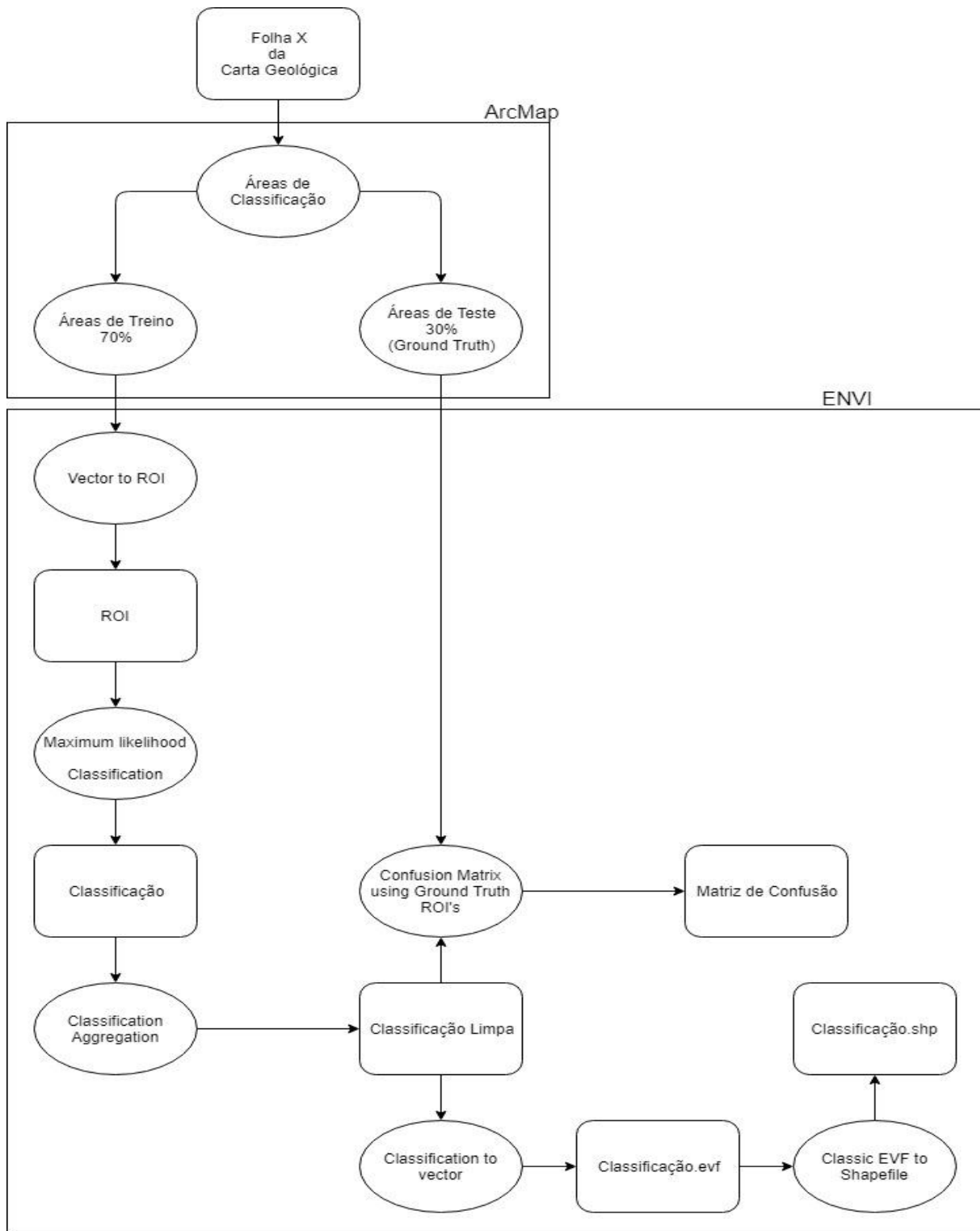


Figura 2.4 Esquema de trabalho e operações para Classificação Assistida das folhas da carta geológica, dividida por 2 produtos de software, ArcMap e ENVI

## 2.2.2.3.1 Caso da Folha 34-B

Como já referido, a folha 34-B é um caso particular neste processo. A particularidade desta carta é a semelhança entre as cores escolhidas para a representação das várias camadas, que o algoritmo de *Maximum Likelihood* não consegue distinguir cabalmente e, logo, classifica erradamente. Para ultrapassar este problema a carta foi partida em 5 partes. As divisórias foram escolhidas de modo a isolar camadas cujas cores eram semelhantes em regiões diferentes evitando assim a confusão do algoritmo. A figura 2.5 mostra a segmentação aplicada na carta geológica em questão.

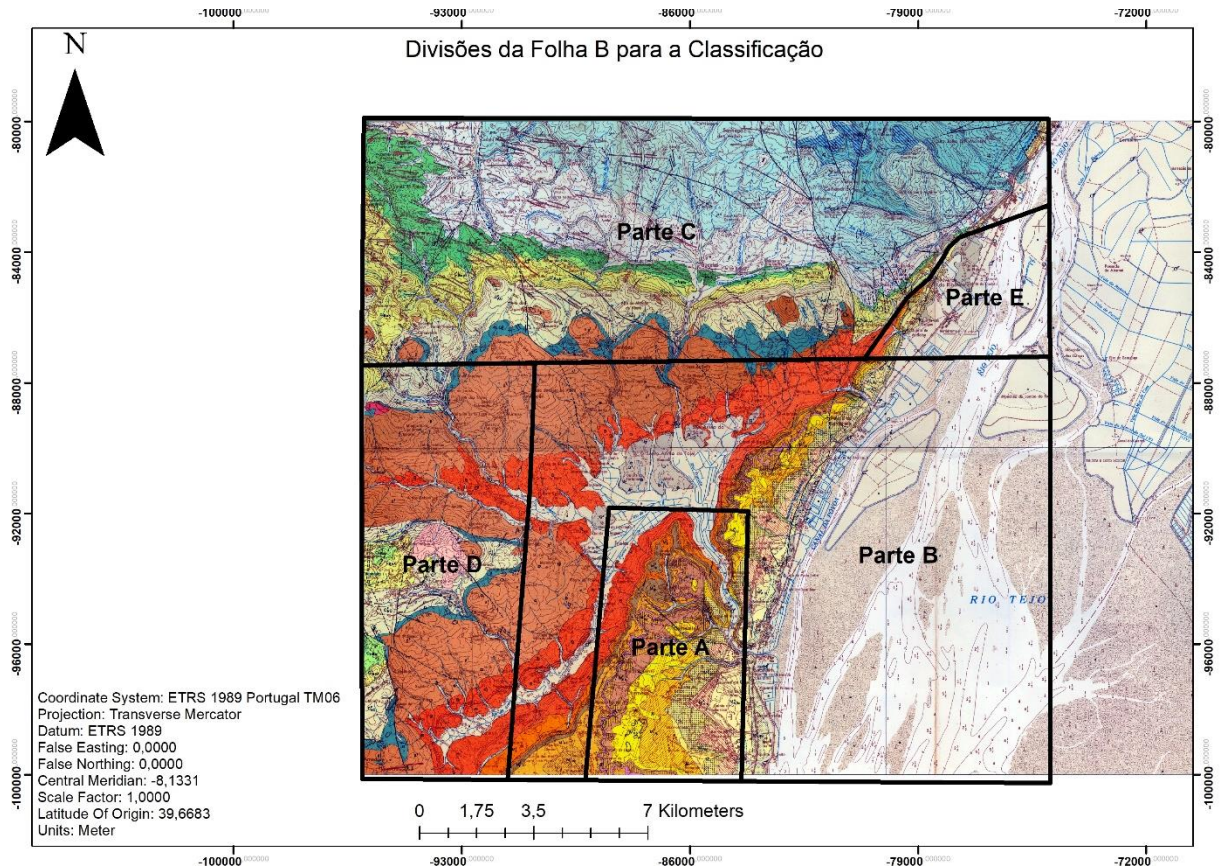


Figura 2.5 Figura ilustrativa das divisórias necessárias criadas na folha 34-B da carta geológica para a sua classificação

O isolamento das camadas mais problemáticas permitiu que a partir daquele momento se pudesse seguir o procedimento definido no capítulo anterior para a classificação das folhas da carta geológica. Para conseguir este processo tiveram de ser criadas áreas de treino e de teste, utilizando a mesma proporção seguida no capítulo anterior. Na tabela 2.4 encontra-se o número de polígonos de treino e de teste utilizados em cada camada e para cada parte da folha dividida.

Tabela 2.4 Formações classificadas em cada parte da Folha 34-B com os polígonos de treino (1ºvalor) e os polígonos de teste (2ºvalor)

<b>Formação</b>	<b>Parte A</b>	<b>Parte B</b>	<b>Parte C</b>	<b>Parte D</b>	<b>Parte E</b>
<b>Água</b>	-	Sim (7+3)	Sim (2+1)	-	Sim (3+1)
<b>Complexo de Benfica</b>	Sim (3+1)	Sim (8+3)	Sim (5+2)	Sim (4+2)	Sim (3+1)
<b>Complexo Vulcânico de Lisboa</b>	-	Sim (6+3)	Sim (9+4)	Sim (6+2)	-
<b>Cretácico</b>	-	-	Sim (14+6)	Sim (8+3)	-
<b>Filões</b>	-	-	Sim (4+2)	Sim (6+2)	-
<b>Jurássico Sedimentar</b>	--	-	Sim (21+9)	-	-
<b>Miocénico</b>	Sim (20+9)	Sim (8+3)	-	-	Sim (4+2)
<b>Quaternário</b>	Sim (6+2)	Sim (9+4)	-	Sim (3+1)	Sim (4+2)

### 2.3 Avaliação da metodologia: Vectorização interactiva vs. Classificação automática

A vectorização das formações geológicas gerou a primeira problemática abordada neste projecto. A criação das *shapefiles* das formações geológicas pode ser feita por dois processos diferentes: vectorização interactiva e classificação automática assistida. A execução do projecto permitiu distinguir ambas as metodologias em termos dos prós e contras que apresentam. Nesta discussão serão apresentados os argumentos a favor e contra de ambas as metodologias. Serão também tecidas considerações sobre a aplicabilidade de cada uma.

A vectorização interactiva das formações geológicas a partir das folhas da Carta Geológica foi o primeiro processo testado. Como tal, este apresenta as seguintes vantagens:

- A possibilidade de corrigir problemas de desenho das folhas da carta, quer seja entre várias folhas ou apenas numa.
- Agrupar as formações geológicas vectorizadas pelas divisórias consideradas apropriadas ou necessárias.
- Vectorização das falhas geológicas - feitas como uma *shapefile* de linhas ao invés de polígonos, que permite a mais fácil vectorização das formações geológicas, quando estas são muito condicionadas à superfície pela tectónica.
- Maior precisão das formações vectorizadas. A definição dos polígonos vectorizados interactivamente não é definida pelo tamanho do pixel da folha da carta geológica utilizada.

No entanto apresenta também desvantagens:

- O tempo para vectorizar quatro folhas da carta geológica foi de aproximadamente 3 semanas. Para uma área maior o tempo necessário poderia ser impeditivo.
- Uma vez que o processo é lento e repetitivo a possibilidade de existirem erros de vectorização é grande.

O segundo processo foi a classificação automática assistida das cartas geológicas a partir do algoritmo *Maximum Likelihood*. Este processo apresenta as vantagens:

- Classificação assistida das cartas geológicas é um processo rápido. Se for necessário, é feita a edição (corte de zonas problemáticas) das folhas da Carta Geológicas. A preparação das áreas de treino e teste e a classificação demoram apenas alguns minutos. No entanto a criação destas áreas envolve o estudo da carta geológica, mas esta tarefa não é morosa. A criação das áreas com as ferramentas de edição do *ArcMap*, após o estudo da carta, é também um processo rápido.
- Permite classificar de várias maneiras as diferentes formações geológicas. De acordo com a necessidade, é possível agregar várias formações.

As desvantagens desta metodologia são:

- O processo de classificação é susceptível a cores muito semelhantes. Formações com cores próximas podem confundir o algoritmo de classificação e levar a erros. Podem também surgir problemas quando existem camadas que queremos agregar (por uma cor semelhante) mas que sejam representadas por simbologias muito diferentes.
- O processo de edição posterior das *shapefiles* é complicado. Depois de se classificar a folha, o resultado deve ser exportado para uma *shapefile*. A posterior junção de todas as *shapefiles* das formações geológicas resultantes das classificações deve ser feita no *ArcMap*. A edição do ficheiro não é fácil. Existem numerosas zonas mal classificadas devido à presença de linhas de separação de camadas, linhas de topografia entre outras. Estas zonas apesar de apenas terem alguns pixels têm de ser limpas antes que as camadas vectorizadas possam ser utilizadas.

Além das vantagens e desvantagens apresentadas acima, é possível avaliar a qualidade do método de classificação assistida das folhas da Carta Geológica através das respectivas matrizes de confusão. São apresentados na tabela 2.5 os resultados principais das matrizes de confusão de cada uma das classificações. As matrizes completas encontram-se em anexo (anexo 13 – anexo 20).

Tabela 2.5 Resumo dos valores de exatidão, coeficiente K e maiores erros de comissão e omissão de todas as folhas classificadas

Folha	Exatidão Global	Coeficiente K	Maior erro de Comissão	Maior erro de Omissão
<b>34-A</b>	96.67%	0.9275	68.51% - Filões e Massas Ígneas	69.36% - Filões e Massas Ígneas
<b>34-B-a</b>	98.30%	0.9678	9.5% - Complexo de Benfica	2.33% - Quaternário
<b>34-B-b</b>	86.74%	0.7878	33.56% - Quaternário	34.86% - Quaternário
<b>34-B-c</b>	81.46%	0.7425	93.54% - Filões e Massas ígneas	23.86% - Cretácico
<b>34B-d</b>	81.18%	0.7547	45.73% - Quaternário	37.03% - Cretácico
<b>34B - e</b>	95.82%	0.9316	19.12% - Miocénico	3.99% - Água
<b>34-C</b>	97.44%	0.9236	52.08% - Jurássico	11.88% - Filões e Massas Ígneas
<b>34-D</b>	95.43%	0.9266	14.15% - Cretácico	13.40% - Quaternário

Com base nesta tabela é necessário distinguir os vários parâmetros apresentados:

- **Exatidão Global** – Percentagem de pixels classificados correctamente entre todos os pixels da imagem a classificar.
- **Coefficiente K** – Concordância entre a classificação e a verdade de terreno.
- **Erro de Comissão** – Pixels classificados numa classe que não pertencem a essa mesma classe
- **Erro de Omissão** - Pixels que pertencem a uma classe, mas que não foram classificados nessa mesma classe.

Verifica-se que de uma maneira geral, a classificação das folhas 34-A, 34-C e 34-D apresentam uma boa exatidão global e concordância com a verdade da folha da Carta Geológica. Estes resultados são possíveis porque nestas folhas não existem formações com cores demasiado próximas, permitindo a sua individualização na classificação final. Apenas é necessário referir que na carta 34-A, a formação de Filões e massas ígneas encontra-se bastante mal classificada. Na carta 34-C mais de 50% dos pixels classificados como pertencentes à formação do Jurássico não lhe pertencem. Estes problemas devem-se à proximidade de cores que existem nestas formações, no entanto nestas folhas as mesmas têm pouca expressão, logo não afectam a exatidão global final.

A folha 34-B, ao contrário das restantes apresentou maiores problemas. Como foi referido na metodologia, existe uma proximidade em termos de cor entre várias formações. As mais problemáticas são o Jurássico (em que uma unidade se confunde com aluviões Quaternário), o Cretácico (confundível com o Miocénico) e por fim o Miocénico, que além de se confundir com o Cretácico, também uma das suas subdivisões se confunde com o Complexo Vulcânico de Lisboa. A solução encontrada para estes problemas foi tentar separar as formações geológicas com as cores mais próximas. Este processo, no entanto, nem sempre foi possível dado as interconexões entre as camadas.

Onde foi possível separar as formações problemáticas (Partes A e E) os resultados de exatidão e coeficiente K aproximaram-se dos valores conseguidos nas restantes folhas. Onde não foi possível os valores foram mais baixos (valores de exatidão de aproximadamente 80% e 0.78 para o coeficiente K).

Com base nesta avaliação de vantagens e desvantagens de ambas as metodologias e ainda a avaliação da exatidão da classificação do método de classificação assistida, verificou-se que ambas estão equivalentes, embora se mantenha o problema do tempo necessário para implementar a primeira metodologia e os problemas que têm de ser ultrapassados na segunda metodologia.

No entanto, considerou-se que cada metodologia terá aplicações diferentes. A vectorização interactiva é um processo mais moroso, mas também mais preciso e eficaz na correção de problemas nas cartas, por isso, deverá ser utilizado em vectorizações de áreas pequenas e/ou em que existam problemas na ligação de várias cartas, onde é necessária uma maior atenção a este tipo de detalhes.

Para a vectorização assistida a aplicação principal será em cartas de grandes dimensões ou múltiplas cartas geológicas ligadas onde uma vectorização interactiva seria demasiado demorada. Este procedimento permite então que a vectorização das cartas geológicas seja escalável, ou seja tanto possa ser efetuado para pequenas ou grandes áreas. No entanto existe sempre o problema de que demasiados pixels erradamente classificados podem levar a que surjam lacunas nas camadas após a sua limpeza, prejudicando a qualidade do produto final.

## 2.4 Problemas encontrados nas folhas das cartas geológicas

Durante a vectorização interactiva, descrita em 2.2.2.2, foram identificados alguns problemas com as várias folhas da carta geológica. Seguidamente será feita uma descrição dos principais problemas encontrados:

- Semelhanças nas cores numa mesma folha – Várias formações na mesma folha encontram-se representadas com cores semelhantes o que gera problemas a nível da identificação visual das mesmas. Exemplo deste problema é a formação do Cretácico da folha 34-B que é de cor muito semelhante à formação do Miocénico. Este problema encontra-se ilustrado na figura 2.6.

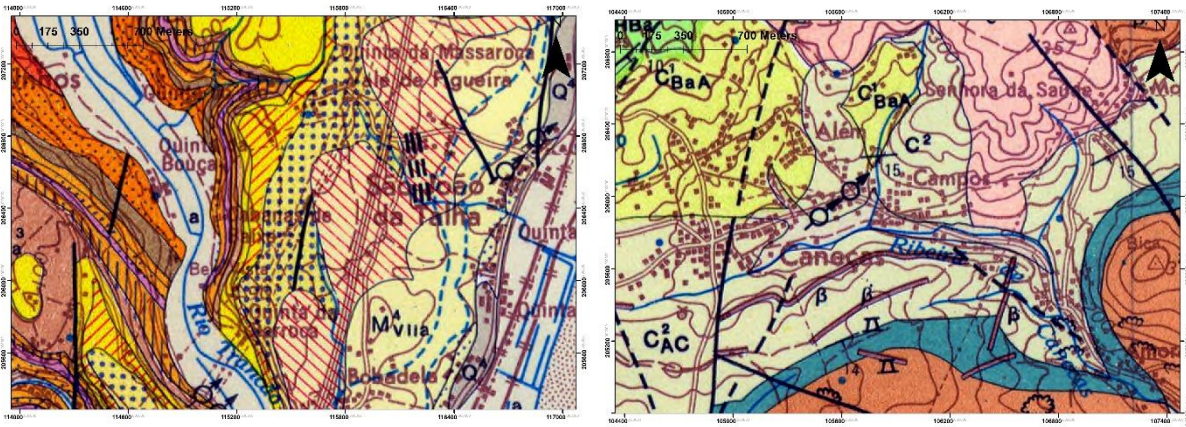


Figura 2.6 Pormenores da folha 34-B da Carta Geológica de Portugal onde se verifica a proximidade de cores entre a camada Miocénica ( $M^{VIIa}$ ) e a do Cretácico ( $C^{2Ac}$ )

Além da formação do Cretácico da folha 34-B, na figura 2.7 está também visível a grande semelhança de cor na formação de Aluviões quaternários e na formação do Jurássico.

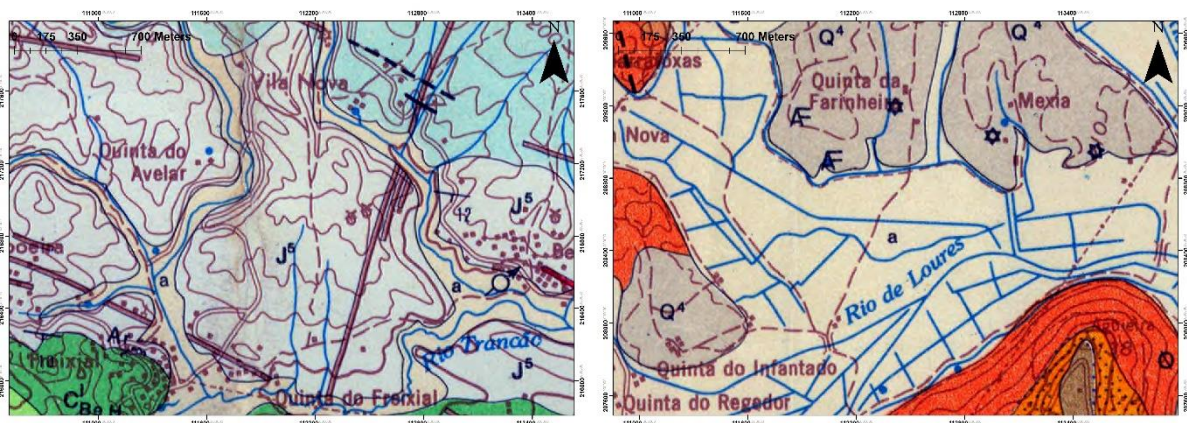


Figura 2.7 Pormenores da folha 34-B da Carta Geológica de Portugal onde se verifica a proximidade de cores entre a formação do Jurássico ( $J^5$ ) e a formação de aluviões ( $Q^4$ )

- Continuação entre formações entre as várias folhas - Verifica-se que ao juntar as 4 folhas existem formações numa folha representadas até ao limite dessa mesma folha e que na transição para a folha seguinte não existe a sua continuação. Este problema verifica-se especialmente entre as folhas 34-A e 34-C e é ilustrado na figura 2.8.

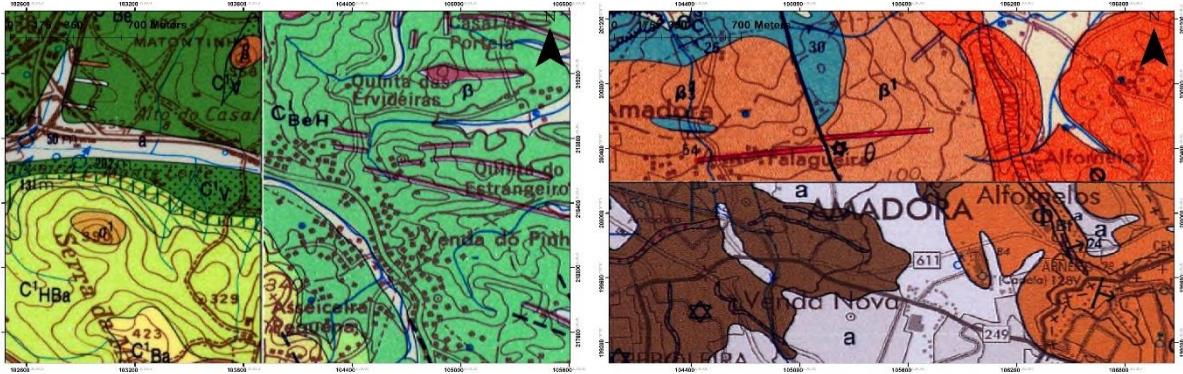


Figura 2.8 Esquerda - Contacto entre a folha 34-A e 34-B da Carta Geológica de Portugal onde se verifica o desalinhamento da formação aluvião (a). Direita - Contacto entre a folha 34-B e 34-D onde se verifica o desaparecimento da formação de aluviões (a) e também de uma falha.

- Problemas de continuidade entre falhas e outras estruturas lineares entre folhas – Também ilustrado na figura 2.8 verifica-se que falhas existentes numa folha da carta geológica ao chegarem à transição para a carta seguinte desaparecem ou vão surgir significativamente desviadas da orientação que tinham na carta anterior.
- Problemas na cor da mesma formação em várias folhas da Carta Geológica – Existe pelo menos um caso em que a mesma unidade cretácica tem numa folha uma cor e na folha seguinte apresenta outra. A figura 2.9 ilustra este problema.

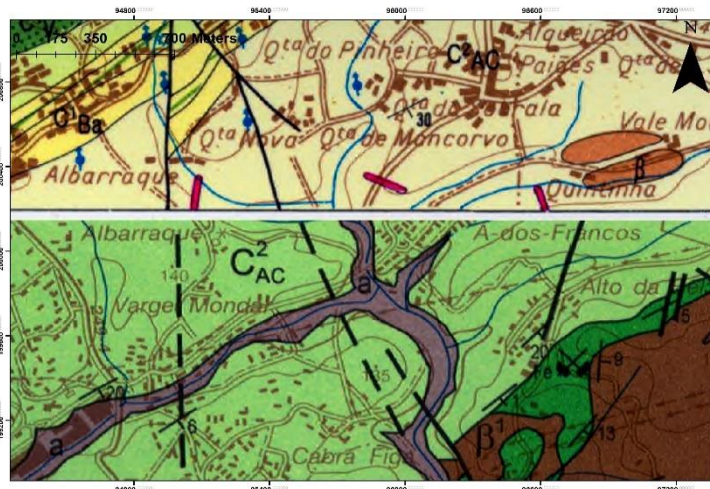


Figura 2.9 Contacto entre a folha 34-A e 34-C da Carta Geológica de Portugal onde se verifica que a mesma formação em duas folhas diferentes apresenta cores diferentes (Camadas  $C^2_{AC}$ )

A análise das cartas geológicas mostra que estas têm uma diferença de idades significativa, sendo a mais antiga de 1991 e a mais recente de 2008. Durante este período temporal foram conseguidos avanços na compreensão das várias formações geológicas e novos estudos foram feitos que permitiram identificar mais claramente tanto os limites das várias formações como a posição correta das várias estruturas geológicas. Esta evolução na compreensão da geologia justifica as diferenças na posição das formações geológicas e das restantes estruturas. No entanto, a única justificação encontrada para as diferenças de cor nas formações geológicas será a de cada folha ter sido produzida por uma entidade diferente, não aproveitando a paleta de cores de outras folhas já existentes. Manter a paleta de cores para as cartas deveria ter sido uma prioridade, pelo menos para que todas as formações da carta geológica fossem facilmente identificadas em folhas diferentes e a sua vectorização fosse simplificada.

#### 2.4.1.1 Utilização das camadas vectorizadas

As formações vectorizadas foram utilizadas para a identificação das formações geológicas no mapa 3D. Esta necessidade surge do facto da textura utilizada para o terreno, embora seja constituída pelas cartas geológicas, se encontrar em formato *raster* e não possuir atributos que separem as formações e, portanto, a sua informação não ser consultável.

Para que a *shapefile* dos polígonos limite das formações geológicas vectorizadas possa ser utilizada para fornecer a informação geológica associada quando seleccionada por um utilizador, optou-se por sobrepô-la à textura do terreno, mas em modo transparente. Para além disso, de modo a ajustar-se ao relevo, os polígonos tinham de possuir informação de elevação em toda a sua área. Para conseguir cumprir estes requisitos, em ambiente *ArcMap*, converteu-se o MDT gerado em 2.2.1 do formato Raster para um formato TIN (*Triangulated Irregular Network*). Seguidamente, utilizando a ferramenta *Interpolate Polygon to Multipatch* sobre o ficheiro TIN criado anteriormente e a *shapefile* de polígonos referentes aos limites das formações geológicas, é criado um modelo *multipatch* (rede de triângulos tridimensionais) com informação de altimetria no interior das formações geológicas.

O esquema das operações encontra-se na figura 2.10. Este passo é necessário para que os polígonos das formações geológicas possam ser importados para o *CityEngine* como modelos 3D em formato *multipatch*.

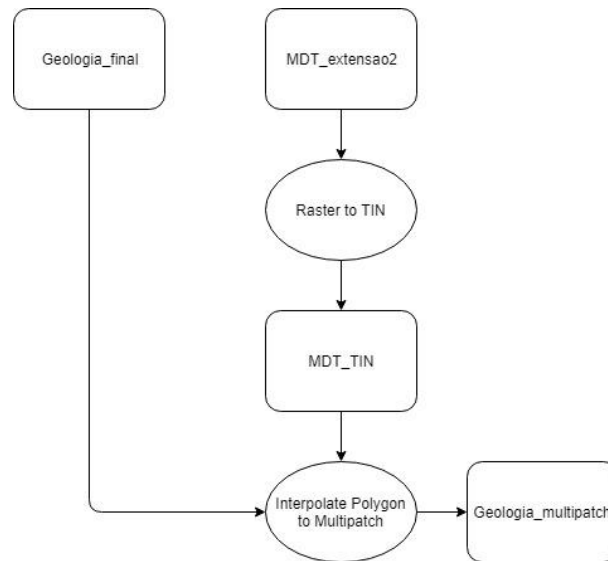


Figura 2.10 Esquema de trabalho e operações para a criação de um modelo *multipatch* para a identificação das formações geológicas no Mapa 3D

## 2.5 Aquisição da cobertura fotográfica para a produção dos modelos 3D

A produção dos modelos 3D de amostras geológicas foi feita através do *software Pix4D* que utiliza algoritmos de fotogrametria para a construção dos mesmos. Como tal, é necessário que exista uma cobertura fotográfica detalhada de cada uma das amostras para que o *software* possa correctamente criar uma nuvem de pontos e assim gerar um modelo 3D. Para a obtenção da cobertura fotográfica foi utilizada uma câmara Nikon D5000. Para assegurar a qualidade das fotografias obtidas teve-se em atenção o cumprimento de determinados aspectos.

O primeiro destes aspectos foi garantir que cada fotografia captasse correctamente toda a amostra, sem que existissem áreas desfocadas. Outro aspecto era assegurar que todas as fotografias tivessem uma boa e uniforme iluminação. Tal foi conseguido com a câmara fotográfica em modo manual para que se pudessem ajustar os seus diversos parâmetros. Foram também utilizadas 5 fontes de luz, 2 de cada lado da amostra e uma fonte frontal. Os parâmetros modificados para conseguir a fotografia óptima são seguidamente listados:

- **Parâmetro F** – Este parâmetro é um rácio entre a distância focal da objectiva da câmara e a abertura efectiva do diafragma. Este parâmetro determina a quantidade máxima de luz que a lente permite captar e ainda a profundidade de campo captada. Valores de F baixos (abertura grande) permitem apenas que o sensor da câmara foque zonas limitadas do objecto a ser captado, enquanto que valores de F maiores (abertura pequena) permitem maiores profundidades de campo.
- **Tempo de exposição** – O tempo de exposição é o tempo que uma câmara demora a captar uma fotografia. O ajuste deste parâmetro permite duas possibilidades: aumentar ou diminuir a quantidade de luz que o sensor capta e captar pormenores de cenas em que existe movimento. Valores muito altos do tempo de exposição captam mais luz, mas objectos em movimento ficarão desfocados. Pelo contrário, valores de tempo de exposição baixos captam menos luz, mas permitem captar melhor objectos em movimento.
- **ISO** – Parâmetro que controla a sensibilidade do sensor de uma câmara.

Os parâmetros ótimos foram obtidos por experimentação com uma amostra geológica. Estes encontram-se na seguinte tabela (tabela 2.6).

Tabela 2.6 Parâmetros utilizados na câmara fotográfica utilizada na obtenção da cobertura fotográfica das amostras geológicas

Parâmetro	Valor
<b>F</b>	1/11
<b>Tempo de exposição</b>	1/30 segundos
<b>ISO</b>	400

Estes parâmetros permitem que cada fotografia tenha uma boa profundidade de campo de modo que toda a amostra seja captada com detalhe em cada fotografia. Os valores de ISO e tempo de exposição não necessitam de ser demasiado altos uma vez que a amostra teve sempre uma boa iluminação artificial de modo a garantir também a uniformidade desta.

Após a determinação dos parâmetros óptimos foi definido como seria realizada a captação das fotografias. Cada amostra teria de ser fotografada em fiadas circulares (anéis) de pelo menos duas perspectivas diferentes (uma superior e outra inferior) como se vê na figura 2.11, de uma fase já posterior do processo de modelação. Ambas as fiadas teriam de ter alguma sobreposição para que na fase seguinte se pudesse realizar a união de ambas de modo a conseguir uma cobertura fotográfica esférica em torno de cada amostra.

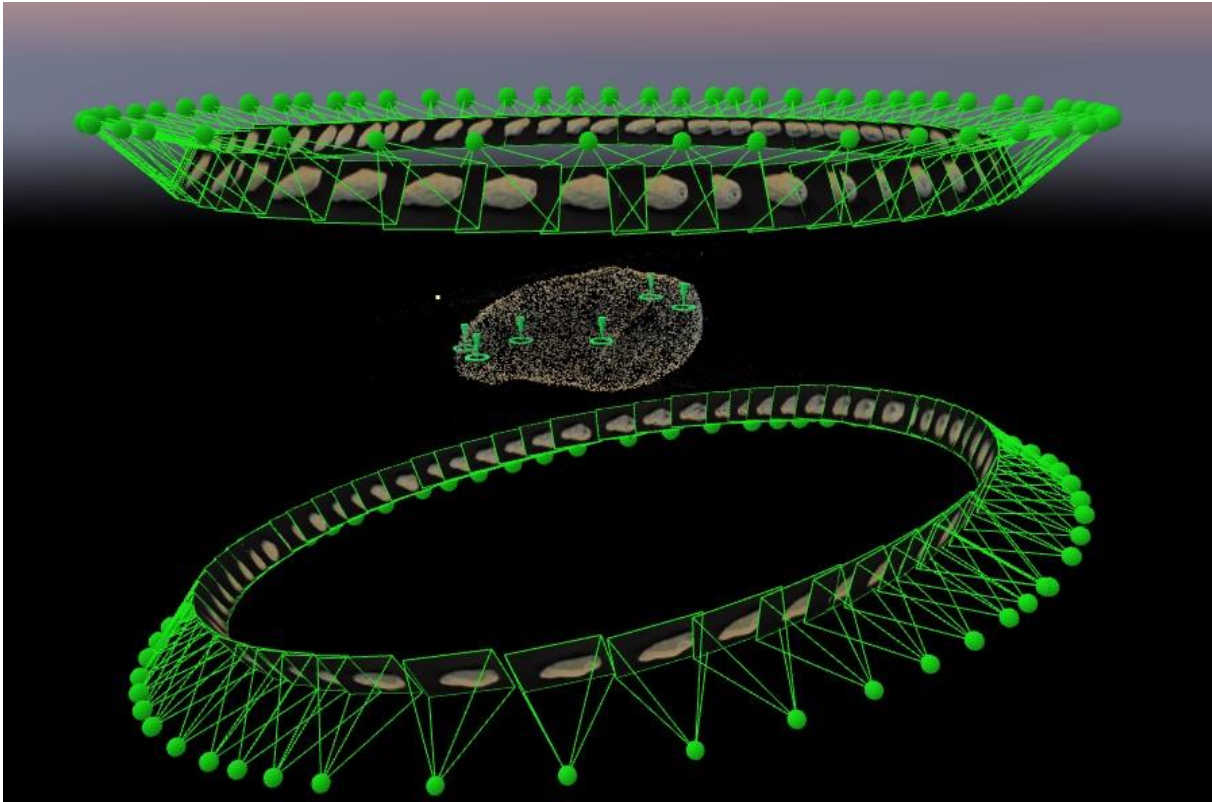


Figura 2.11 Exemplo da cobertura fotográfica (em anéis) de uma nuvem de pontos completa

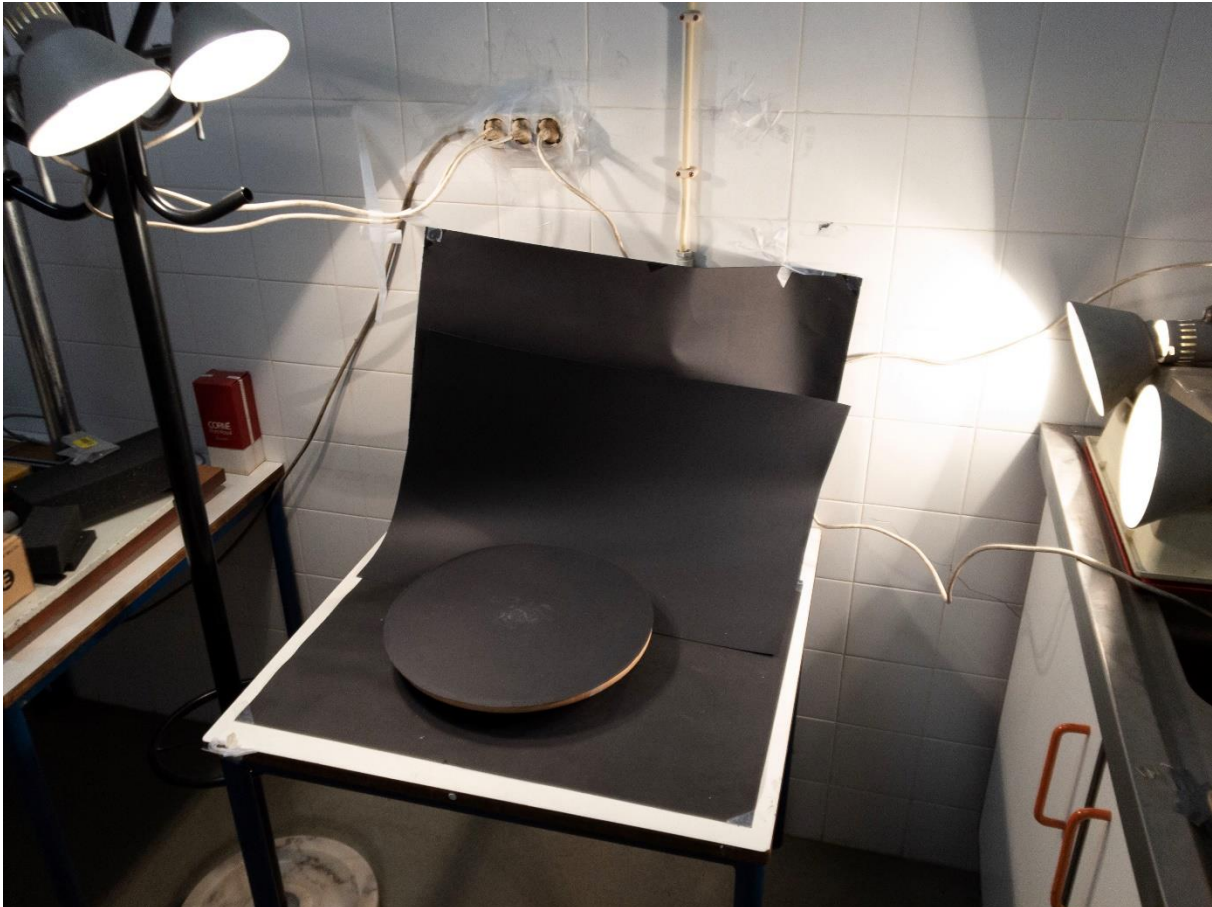
Foram sempre captados 2 anéis e se fosse necessário procedia-se à captação de um terceiro anel. Para começar a fase de aquisição de fotografias das amostras colocaram-se as mesmas numa mesa rotativa (figura 2.12) com um fundo completamente negro (de modo a minimizar o ruído no modelo final).



Figura 2.12 Base rotativa circular utilizada para conseguir a cobertura fotográfica das amostras em fiadas circulares

Para se conseguir captar todos os pormenores das amostras definiu-se que a amostra deveria ser fotografada à medida que se ia rodando a mesa no mínimo uma vez a cada  $10^\circ$  de rotação. Com esta rotação verifica-se que para cada anel de cada amostra deve existir um mínimo de 36 fotografias (volta completa =  $360^\circ$ ). Também foi necessário garantir que a amostra se encontrava bem iluminada.

Para isto foram utilizados os 4 focos de luz visíveis na figura 2.13 sobre a mesa rotativa e mais um quinto, móvel, que apenas se coloca quando se iria proceder à captação da fotografia. Após a captação de ambos os anéis, todas as fotografias foram transferidas para o computador onde seriam processadas.



*Figura 2.13 Plataforma circular com fundo negro e focos de luz ligados utilizados na obtenção da cobertura fotográfica circular das amostras*

Como passo final deste ponto foram ainda verificadas todas as fotos para garantir que as amostras com cor mais escura apresentavam boas condições de iluminação. Caso não apresentassem, as fotografias eram repetidas, para garantir o sucesso dos algoritmos de correlação de imagens utilizados no *software*.

## 2.6 Criação dos modelos 3D

Após a aquisição da cobertura fotográfica procedeu-se à fase de criação dos modelos 3D. Neste tópico serão descritos os procedimentos que permitiram passar da cobertura fotográfica de cada amostra para um modelo 3D da mesma. O processo encontra-se explicado na figura 2.14 e detalhado nos capítulos seguintes.

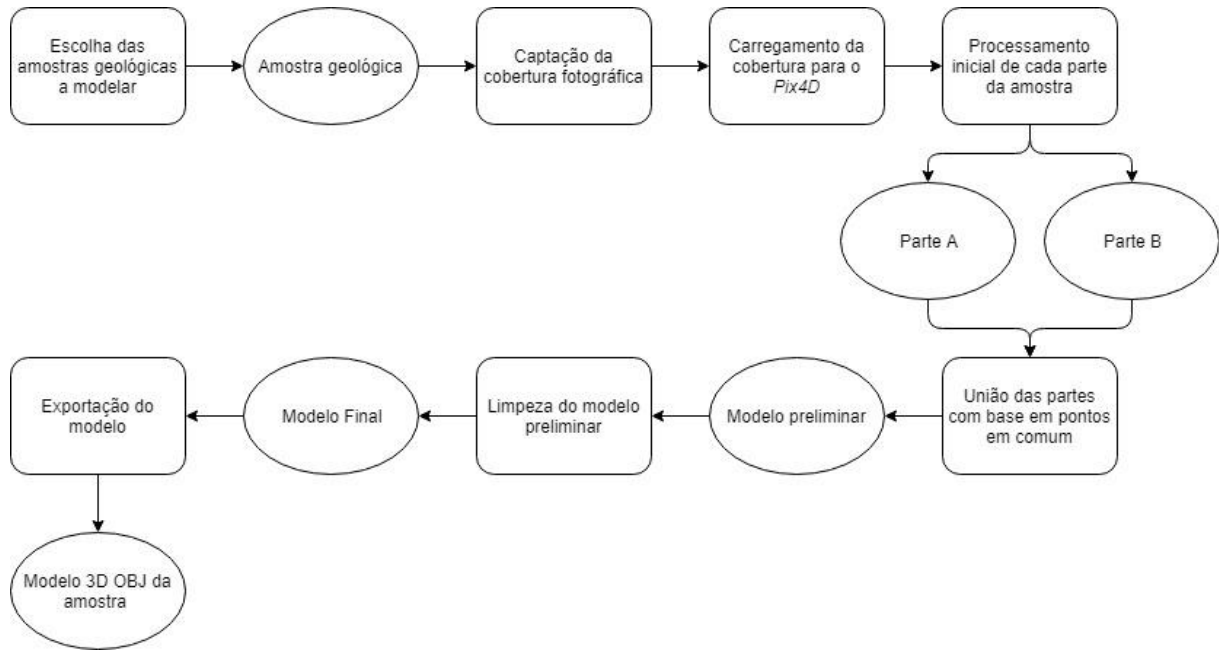


Figura 2.14 Esquema de trabalho e operações para a criação de modelos 3D a partir de amostras geológicas

### 2.6.1 Carregamento da cobertura fotográfica e processamento inicial

Após a aquisição da cobertura fotográfica esta foi carregada para o *software Pix4D*. Cada anel de fotografias sucessivas de uma amostra deve ser carregado individualmente. Cada amostra a ser recriada foi composta por duas ou mais partes (fiadas de fotografias) que foram posteriormente unidas. Cada parte constituiu por isso inicialmente um projecto independente, no *Pix4D*. A criação de um novo projecto permite carregar todas as fotografias de cada parte da amostra para o mesmo.

Depois do carregamento efetuado foi realizado o processamento inicial em que são determinadas as posições e orientações de todas as fotografias num referencial centrado no centro de projecção de uma das fotografias da fiada.

Seguidamente poderá ser gerada a nuvem de pontos de cada parte do modelo e ainda gerar uma textura sobre um modelo 3D provisório para que se verifique se a qualidade das fotografias será suficiente para um modelo com qualidade. No entanto este passo não é necessário para os procedimentos seguintes.

## 2.6.2 Identificação de pontos em comum e optimização

Após a criação da nuvem de pontos inicial para cada metade de cada amostra utilizou-se a ferramenta do *Pix4D TiePoint manager*. Esta ferramenta permite a identificação de pontos iguais, nas várias fotografias que compõem um modelo, ou seja, o mesmo ponto do objecto pode ser identificado em várias perspectivas, dependendo do número de fotografias que foram capturadas para cada rocha.

Depois da identificação de um ponto numa parte da amostra deve ser identificado o mesmo ponto nas outras partes da mesma amostra, no mínimo em três fotografias de cada fiada.

Este processo deve seguir algumas regras para que a união de ambas as partes seja correctamente conseguida. A primeira regra é que para que um ponto seja correctamente posicionado na nuvem de pontos 3D, nas 3 coordenadas espaciais, cada ponto deve ser identificado em pelo menos 3 fotografias não consecutivas para que os ângulos formados pelos respectivos eixos fotográficos sejam o maior possível. Esta regra proporciona maior precisão na determinação das coordenadas 3D do ponto por intersecção directa espacial.

A experiência obtida neste projecto dita que é precisa pelo menos a identificação em 4 fotografias, idealmente em 5. O espaçamento ideal entre fotografias identificadas deve ser de pelo menos duas. Outra regra que deverá ser cumprida é que a identificação de cada ponto deve ser feita ao nível do pixel, ou seja, em cada fotografia a identificação deverá ser feita em pixéis correspondentes.

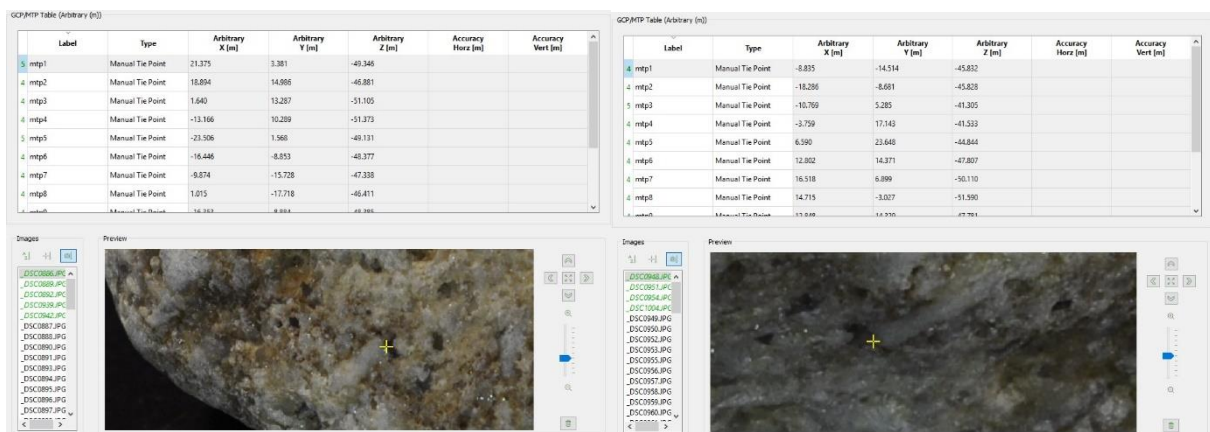


Figura 2.15 Vista do Tie Point Manager do software Pix4D com a identificação de um Tie Point na parte A e B do projecto do modelo 3D do Arenito

Na figura 2.15 encontra-se um exemplo do pormenor do processo de identificação dos pontos em comum nas duas partes constituintes de um único projecto.

Após a identificação na fotografia numa parte da amostra, o mesmo ponto deve ser identificado na segunda parte da amostra de modo que ambos os pontos tenham o mesmo número identificativo. Se o mesmo ponto não tiver o mesmo número em ambas as partes a junção das mesmas não será correctamente executada.

Deve-se também garantir que cada parte da amostra deve ter pelo menos 5 pontos identificados bem distribuídos. Por fim, deve-se também assegurar que os pontos identificados estão situados na zona de junção das partes do modelo.

Antes de realizar a junção das duas partes realizou-se um último passo em que se faz uma nova optimização das posições e orientações das fotografias com base nos pontos em comum. Este passo permite que posicionamentos incorrectos, ao nível do pixel, dos pontos nas fotografias sejam ajustados.

Este último passo é particularmente importante pois devido às dificuldades em identificar o mesmo pixel em fotografias diferentes, em alguns pontos não se conseguia utilizar todas as medições em fotografias na geração da posição 3D do ponto por serem demasiado discrepantes.

Após a optimização da referenciação, cada ponto deverá ter a posição 3D melhor determinada. A figura 2.16 mostra os *tie points* de uma das amostras (modelo completo) correctamente marcados e identificados no espaço.

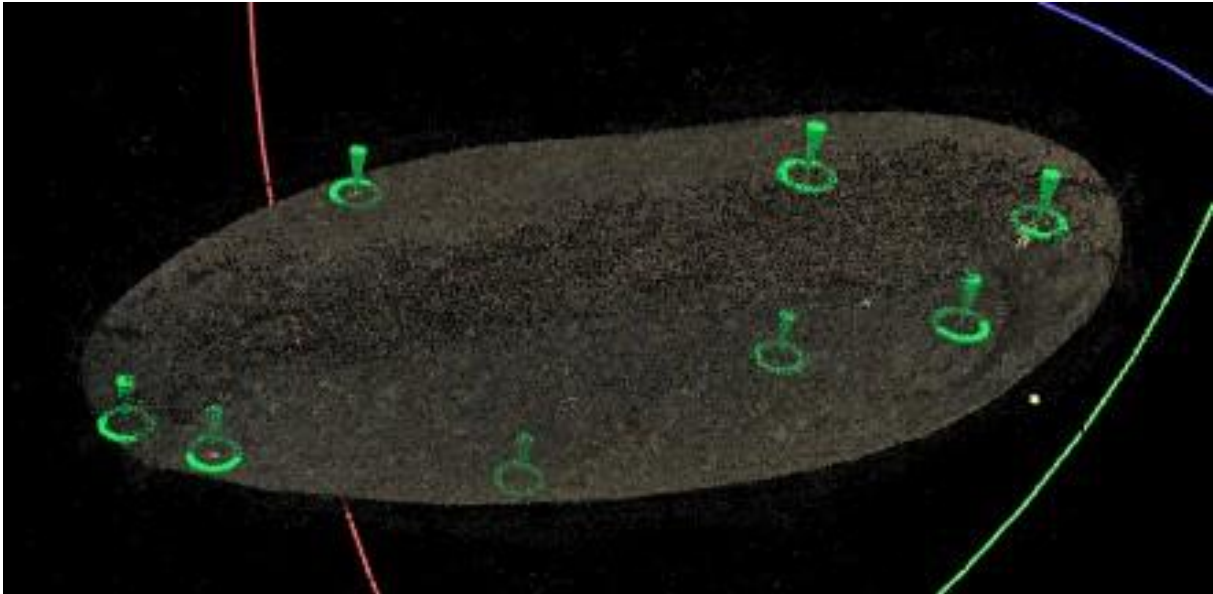


Figura 2.16 Modelo 3D (pré-processado) completo com os Tie Points identificados

### 2.6.3 União das partes e geração da nuvem de pontos

Para realizar a união de ambas as partes foi criado um projecto novo no *Pix4D*. Ao contrário da criação dos projectos de cada parte, neste importam-se dois ou mais projectos iniciais, em vez de apenas fotografias. Estes devem conter, além da nuvem de pontos de ambas as partes da amostra e as orientações das fotografias, também os *tie points* (pontos em comum) que foram medidos em cada amostra.

Após o carregamento de ambos os projectos, primeiro verifica-se que os pontos em comum estão correctos, ou seja, termos o número correcto de pontos (um número superior significa que os pontos não têm o mesmo nome em ambas as partes). É também necessário verificar que os pontos estão na posição correcta na amostra.

O *software* calculou novamente as posições e orientações relativas de todas as fotografias de ambas as partes que cobrem a amostra completa (vista de cima e de baixo).

Por fim, e antes da criação da nova nuvem de pontos densa, os *tie points* devem ser novamente utilizados para otimizar a referenciação relativa das fotografias para garantir que a posição de cada ponto em comum é calculada neste novo projecto com recurso a todas as fotos de ambas as partes.

O passo seguinte foi a geração de uma nova nuvem de pontos densa. A nuvem de pontos é um conjunto de pontos no espaço que representam medições realizadas da superfície de objectos. Cada ponto apresenta coordenadas 3D, ou seja, em X, Y e Z. Estes pontos servirão mais à frente para a reconstrução do objecto em 3D.

O *software* cria automaticamente cada ponto da nuvem de pontos a partir da posição e orientação calculada das fotografias obtida no processamento inicial e da detecção de pontos homólogos (correspondentes) nas várias fotografias da cobertura.

Deve ser verificada, em especial, a zona de união entre as duas amostras (zona onde deverão estar os *tie points*). Se não houver uma correta união de ambas as partes da amostra vão existir zonas duplas na nuvem de pontos. Esta situação é exemplificada na figura 2.17.

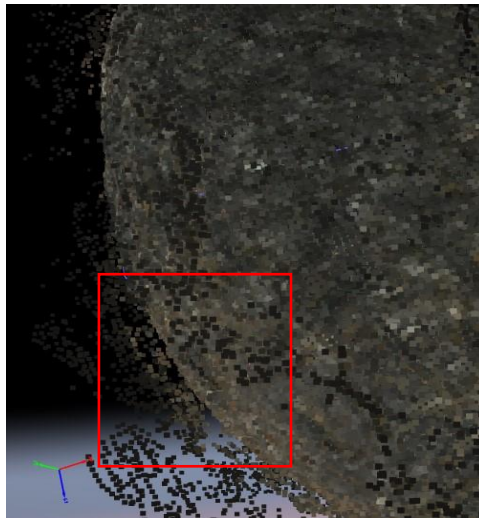


Figura 2.17 Superfícies duplicadas na nuvem de pontos por problemas na união das partes dos modelos

Caso esta situação se verifique deve ser refeito o passo anterior (verificar o estado de todos os *tie points* e se necessário adicionar mais, para garantir uma melhor união dos projectos parciais).

Por fim, em geral é visível que a nuvem de pontos contém áreas mais ou menos extensas que não pertencem à amostra que se pretende modelar. Estas zonas correspondem à superfície onde a amostra estava assente quando da aquisição das fotografias e que é preciso retirar antes da geração do modelo 3D.

#### 2.6.4 Limpeza do modelo e geração da textura

As áreas que não pertencem à amostra devem ser eliminadas da nuvem, pois estas alteram o modelo final que será gerado. Estas zonas são evidenciadas na figura 2.18.

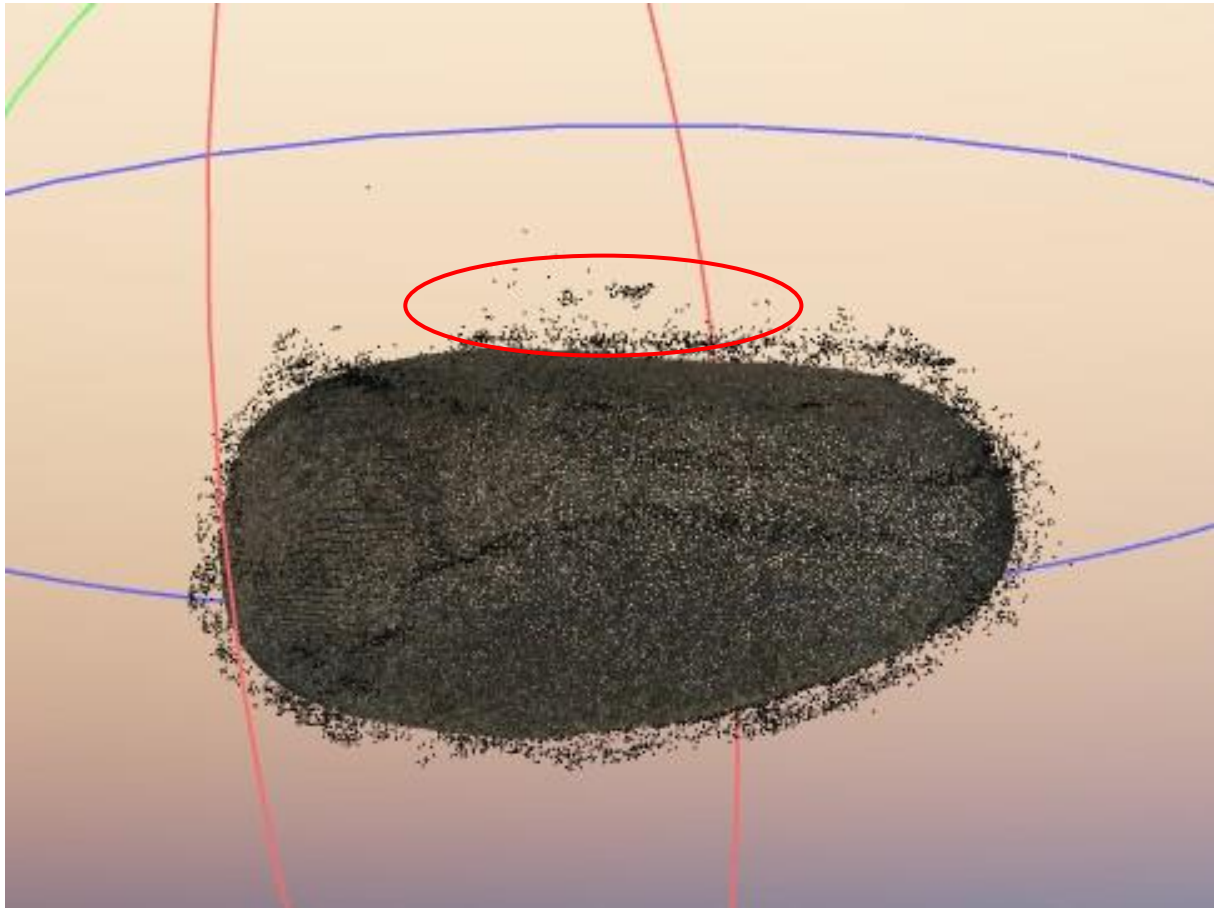


Figura 2.18 Nuvem de pontos de um modelo completo com zonas a limpar evidenciadas (a vermelho)

A limpeza das zonas que não pertencem ao modelo é feita através da reclassificação dos pontos da nuvem como “não atribuídos”, ou seja, devem ser ignorados na geração do modelo 3D. Após a limpeza de todas as zonas consideradas “lixo” por não pertencerem ao modelo, processa-se a última parte do modelo que será a geração do modelo 3D em si e da sua textura.

Este modelo é feito a partir da nuvem de pontos e utiliza todos os pontos pertencentes à amostra para gerar a superfície do modelo. Por fim, utiliza as fotografias para recriar a textura sobre o modelo 3D. No entanto, antes de se proceder à limpeza deve-se ter em atenção aspectos que podem comprometer o modelo 3D final. O primeiro aspecto é que o processo a partir do qual se gera o modelo final utiliza a nuvem de pontos, logo tem de se ter todo o cuidado para não se eliminarem zonas que são efectivamente a amostra modelada. Por outro lado, verificou-se também que o algoritmo por vezes utiliza pontos para gerar a superfície do modelo que aparentam ser lixo. Este problema só é solucionado por tentativa e erro, após a geração do modelo 3D.

Se esta situação se verificar, ao gerar o modelo 3D vão existir espaços abertos na superfície do modelo. Neste caso deve-se verificar a zona com o espaço vazio e recuperar os pontos de “lixo” para se determinar quais devem ser mantidos na nuvem de pontos final.

Quando finalmente se criou o modelo 3D final verificou-se que a resolução *default* do *Pix4D* é suficiente para que a superfície das amostras seja facilmente identificável e semelhante às originais. Este aspecto é importante dado o objectivo de divulgação da geologia de Lisboa associado a este projecto. Na figura 2.19 é exemplificado um modelo 3D completo com a textura.



Figura 2.19 Modelo 3D completo de Calcário de Liós

### 2.6.5 Exportação do modelo final

A exportação do modelo final 3D de cada amostra completo é feito a partir da opção *export mesh* do *software Pix4D*. A exportação de cada modelo foi feita no formato OBJ. Um ponto a ter em atenção neste passo é garantir que a textura do modelo é embutida no próprio modelo. Este ponto é conseguido retirando a opção *Tiled Texture* nas opções de exportação.

Após esta fase o modelo completo poderá ser utilizado em qualquer dos produtos finais que foram criados.

## 2.7 Avaliação da metodologia: Processo de criação dos modelos 3D

O processo de criação dos modelos 3D desde a aquisição da cobertura fotográfica que os suporta até à sua exportação apresenta desafios que serão únicos a cada amostra geológica que foi modelada.

O primeiro desafio foi a aquisição da cobertura fotográfica. A qualidade das fotografias obtidas dita a qualidade final do modelo e a facilidade do processo de modelação.

Uma boa fotografia para a criação do modelo 3D tem de ser próxima o suficiente para que os detalhes da superfície da amostra sejam visíveis. A captura da fotografia tão próxima da amostra levanta problemas relacionados com a profundidade de campo uma vez que a amostra pode não ficar completamente nítida.

Uma vez que o modelo será tridimensional, cada fotografia contribui para a criação da nuvem de pontos densa. Isto significa que todos os pontos da fotografia que contenham a amostra poderão ser utilizados para criar o modelo final. Se a cobertura fotográfica tiver zonas pouco nítidas, este problema será reflectido no modelo final, ou seja, vão surgir no modelo 3D zonas pouco nítidas.



*Figura 2.20 Modelo 3D final do Granito com área desfocada realçada a vermelho*

Este problema é visível no modelo da amostra de Granito de Sintra. Neste modelo, a zona superior da amostra ficou desfocada em algumas fotografias, o que levou a que o modelo se apresente também ligeiramente desfocado, como é visível na figura 2.20.

Os problemas com as fotografias são explicados com a falta de experiência na captação da cobertura fotográfica e também com a grande proximidade à amostra a modelar (~20 cm).

A aquisição de uma fotografia com qualidade para um projecto deste tipo é uma técnica que apenas com alguma prática leva a resultados que sejam mais satisfatórios.

Existem ainda amostras em que as suas características (tamanho da amostra ou as suas arestas) podem também dificultar a aquisição da fotografia.

A experiência na criação dos modelos mostrou que amostras com uma coloração contrastante e com uma superfície lisa, como o Xisto do Ramalhão, são as mais fáceis de fotografar e posteriormente de modelar (figura 2.21).

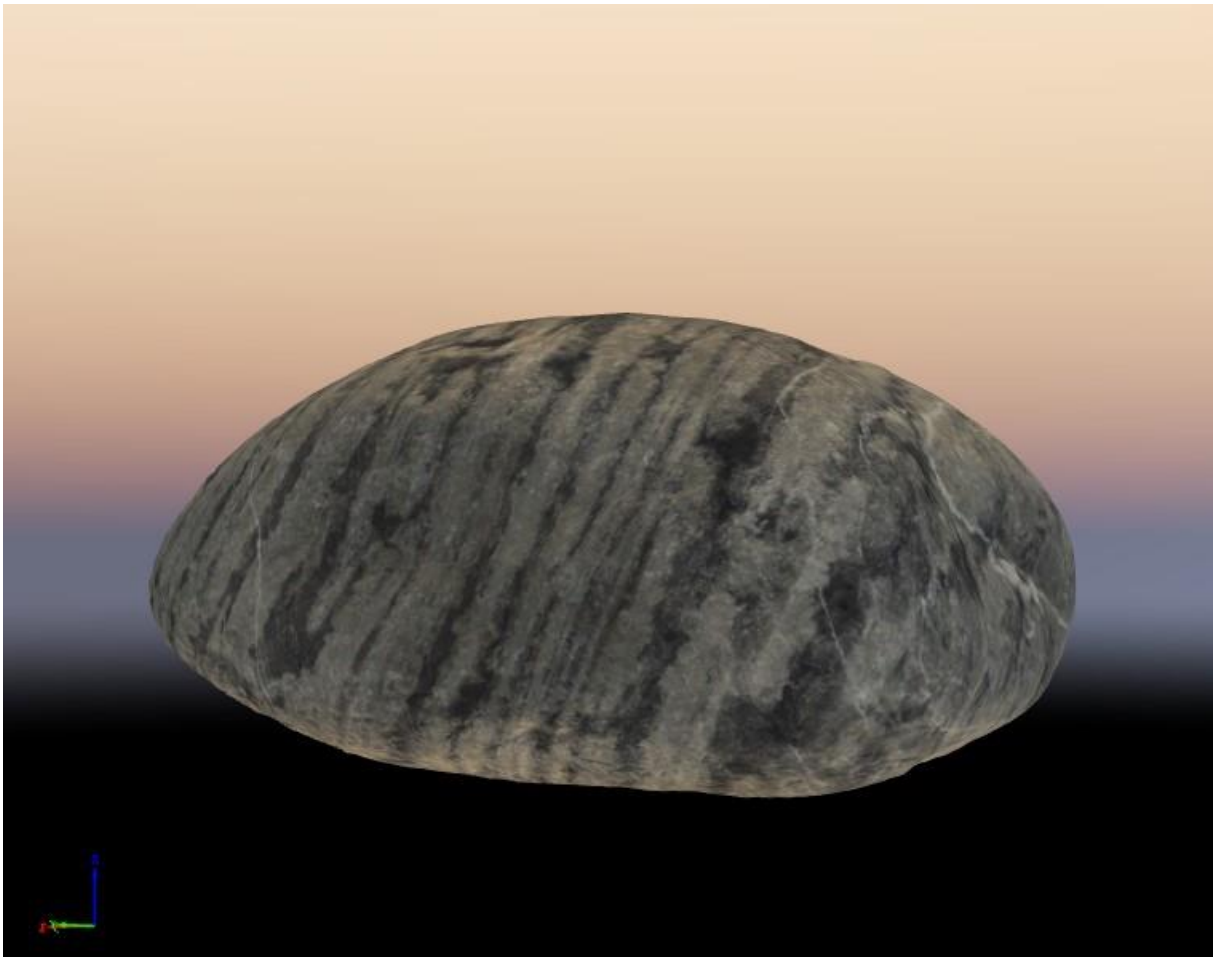


Figura 2.21 Modelo 3D do Xisto do Ramalhão

Em sentido contrário, amostras com cores uniformes e superfícies acidentadas dificultam o processo de modelação. Existiu também um problema relacionado com as formas das amostras. Algumas amostras tinham uma forma regular, que permite facilmente criar as duas perspectivas que captam a totalidade da amostra. No entanto em amostras como o Basalto, a modelação com duas perspectivas criava sempre uma face que não era possível modelar, logo não era possível fazer a união completa das duas perspectivas.

A solução para este problema foi a captação de uma nova perspectiva, tal como foi referido na metodologia. Esta solução criou um problema que é a gestão dos *tie points*.

Como o mesmo ponto pode existir em 3 perspectivas diferentes, a sua gestão tem de ser mais cuidadosa para que os nomes dos *tie points* sejam iguais em cada parte do modelo. Se os nomes não forem iguais a união das partes não é efectuada correctamente.

Depois da união das várias perspectivas foi gerada a nuvem de pontos densa de cada modelo e foi feita a limpeza da mesma. Como já foi referido, a limpeza da nuvem de pontos densa deve ser feita cuidadosamente para não eliminar pontos pertencentes à amostra.

No entanto, mesmo tendo o cuidado de não eliminar pontos pertencentes à amostra, quando se cria o modelo podem surgir espaços vazios no modelo. Este problema provavelmente deve-se à resolução utilizada na criação da nuvem de pontos densa. Como a resolução (densidade de pontos) afecta grandemente o tempo de processamento do modelo, foi mantida num valor suficientemente baixo para o processamento ser mais rápido, mas que permita que o modelo tenha resolução suficiente para ser de qualidade.

O facto de a resolução ser mais baixa significa que ao criar os triângulos que compõem o modelo 3D, o algoritmo possa ter de utilizar pontos que à primeira vista não pertencem à superfície do modelo. A solução que foi encontrada para este problema foi baseada em tentativa e erro. Uma vez que se torna difícil de identificar os pontos exatos que causam o problema, estes devem ser retirados progressivamente até se conseguir uma superfície igual à superfície da amostra e sem o lixo associado ao fundo onde estava a amostra. No caso de surgirem de novo espaços vazios no modelo, os pontos devem ser restaurados, reclassificando-os, e o processo de limpeza deve ser refeito como foi descrito em 2.6.4.

Esta situação pode ser facilmente evitada criando-se modelos com uma maior densidade de pontos, no entanto, deve ser considerado o problema do tempo de processamento da nuvem de pontos densa. Uma maior densidade de pontos pode levar a tempos de processamento até 4 vezes maiores que a solução *default* (ótima). Este tempo de processamento vai também depender do *hardware* utilizado, logo, um computador de maior capacidade conseguirá criar nuvens de pontos densas com maior densidade levando a que este problema possa ser minimizado.

## 2.8 Criação da Base de dados de amostras

Para armazenar a informação sobre cada amostra a apresentar na sua divulgação na *Web* foi criada uma base de dados, a partir do *software ArcMap*. A base de dados é a tabela de atributos de uma *shapefile* de pontos correspondentes à localização física das amostras utilizadas. A geolocalização destas amostras foi realizada no sistema de coordenadas PT-TM06/ETRS89, igualmente utilizado nos restantes dados.

Foram definidos 9 atributos para descrever cada amostra que são os seguintes:

- Nome – O nome comum dado à amostra.
- Formação – A formação geológica em que a amostra se encontra integrada de acordo com a notícia explicativa em vigor da zona.
- Tipo – Tipo de rocha de acordo com o processo genético que lhe deu origem.
- Era – Era geológica da formação a que a amostra pertence.
- Período – Período geológico da formação a que a amostra pertence. Subdivisão da era.
- Idade – Idade absoluta da amostra de acordo com a formação em que está inserida.
- Ambiente – Ambiente de formação que deu origem à rocha. Pode ser magmática ou sedimentar.
- Curiosidades – Curiosidades sobre a formação a que pertence cada uma das amostras. Relacionadas com o seu processo de geração ou com particularidades ou ainda com alguma particularidade exótica da amostra no contexto geológico regional.
- Modelo – Nome do modelo 3D correspondente a cada amostra. Formato OBJ.
- POS X/ POS Y – Coordenadas PT-TM06/ETRS89 de cada amostra geológica.

Estes atributos foram escolhidos porque são os que melhor caracterizam cada amostra e também por serem os mais interessantes para o público em geral.

Esta base de dados foi importada para o *CityEngine* para que possa ser utilizada no carregamento dos modelos 3D para a *scene* que foi criada neste ambiente.

## 2.9 Criação do suporte Web para a divulgação

Com todos os elementos criados e os dados preparados foram construídos dois produtos de suporte à divulgação das rochas virtuais: um mapa 3D interactivo utilizando uma *WebScene* do *software CityEngine*, publicado no *website ArcGis Online* e ainda um *website* onde existe a possibilidade de uma maior interacção com os modelos 3D criado a partir da plataforma *Wix.com*.

### 2.9.1 Mapa 3D

Para o *CityEngine* foram importados o modelo digital de terreno, em formato raster com uma escala de tons de cinzento, e o raster das folhas da Carta Geológica. O primeiro elemento foi utilizado como mapa de elevações e as folhas da carta geológica como textura sobre o mapa de elevações. Estes dois elementos providenciam o aspecto geral ao mapa 3D.

A linguagem de programação CGA é uma linguagem utilizada no *software CityEngine*. CGA é uma sigla que significa *Computer Generated Architecture*. Esta linguagem permite, dentro do *CityEngine*, por meio de rotinas que se denominam ‘regras’, a criação de modelos mais ou menos complexos, dependendo do que se pretende. Estas regras devem ser atribuídas a uma forma ou *shape* previamente carregados para poderem ser utilizadas. No âmbito deste projecto, foram utilizadas 4 regras que permitiram carregar as amostras 3D, criar um modelo transparente a partir de um ficheiro *Multipatch* e criar uma simulação do mar.

Para que as formações geológicas do mapa possam ser seleccionadas e identificadas pelo utilizador na *Web* foi importado para o *CityEngine* também o ficheiro *shapefile multipatch*. Este ficheiro, criado a partir das formações geológicas vectorizadas, permite a identificação das formações geológicas do mapa 3D e pode conter informação associada a cada camada que será viabilizada ao utilizador. Depois de importado, o ficheiro é convertido para um modelo através da regra *gerar\_modelo.cga*. Para que o modelo não obstrua a visualização da textura, visto que vai ter a mesma localização que a mancha na textura a ele correspondente, foi-lhe aplicada a regra *transparencia.cga*. A figura 2.22 apresenta ambas as regras desenvolvidas.

```

/**
 * File:      gerar_modelo.cga
 * Created:   19 Nov 2018 10:21:26 GMT
 * Author:    japgi
 */

version "2018.1"

A-->B.
/**
 * File:      transparencia.cga
 * Created:   19 Nov 2018 10:27:19 GMT
 * Author:    japgi
 */

version "2018.1"
modelo -->
t(0,50,0)
set(material.opacity, 0.0001)
projectUV(4)

```

Figura 2.22 Regras CGA para criar um modelo e para criar a transparência do mesmo. Permite ainda a translação do modelo 50 metros no eixo Y

Todos os modelos 3D das amostras geológicas foram, em seguida, copiados para a pasta em utilização pelo projecto do *CityEngine*. Para o carregamento dos modelos 3D na cena nas coordenadas respectivas foi utilizada a regra *Amostras3D.cga* presente na figura 2.23.

```

/**
 * File:    Amostras3D.cga
 * Created: 14 Nov 2018 10:23:29 GMT
 * Author:  japgi
 */

version "2018.1"

attr F9_MODELOS=""

Ponto --> i("/Geologia/assets/Modelos/"+str(F9_MODELOS))
          s('10000','10000','10000)
          t(0, 500, 0)

```

Figura 2.23 Regra *cga* para carregar os modelos 3D das amostras geológicas a partir da informação presente na base de dados

Para existir uma ligação entre os modelos 3D e as formações geológicas respectivas, foram adicionadas colunas que fizessem esta ligação. As colunas resultam de uma *shapefile* de polígonos circulares criada em *ArcMap*, a partir de um *buffer* de 10 metros dos pontos da base de dados das amostras. Para criar as colunas foi utilizada a regra *colunas.cga* que se encontra na figura 2.24.

```

/**
 * File:    colunas.cga
 * Created: 22 Feb 2019 17:24:25 GMT
 * Author:  japgi
 */

version "2018.1"

colunas -->
extrude(1300)
color(0,0,0)

```

Figura 2.24 Regra *cga* para a criação das colunas de ligação das formações geológicas aos modelos, com uma altura de 1300 metros

Por fim, e para aumentar o efeito apelativo do mapa 3D, foi utilizada a regra *Water.cga* para a geração do efeito de ondulação do mar sobre as zonas identificadas como água (Tejo e Mar). A regra foi obtida num fórum do *CityEngine* e foi criada pelo utilizador *chri7180*. Esta regra permite a alteração da animação da ondulação através da alteração dos parâmetros da onda. Isto permite ter um efeito de mar mais ou menos agitado quando a cena é visualizada na *Web*. A figura 2.25 demonstra a regra referida.

```

/**
 * File:      Water.cga
 * Created:   19 May 2014 18:33:19 GMT
 * Author:    chri7180
 */

version "2018.1"

@Range(-180, 180)
attr Rotation = 0
@Range(0.1, 20.1)
attr Scale = 5
@File
attr Texture = "/Geologia/rules/SeaWater.jpg"
attr SizeX = 100
attr SizeZ = 100

Water -->
    alignScopeToAxes(y)
    rotateScope(0, Rotation, 0)
    setupProjection(0, scope.xz, SizeX * Scale, SizeZ * Scale)
    projectUV(0)
    texture(Texture)
    # This line makes it animate in a web scene.
    set(material.name, "watermaterial__waterparams_50_50")

```

Figura 2.25 Regra cga para criar a superfície da água. Autor: chri7180

Estas regras são importantes para que todos os constituintes da cena possam ser carregados e convenientemente posicionados.

Após o carregamento de todos os componentes e a aplicação das regras, todo o mapa deve ser exportado para uma *Webscene* para ser carregada para o *ArcGis Online*<sup>10</sup>. Esta plataforma online permite o carregamento e visualização e edição de dados provenientes de *software* da ESRI<sup>11</sup>. O registo nesta é gratuito. A plataforma torna possível a criação de aplicações interactivas (com adição de outros serviços geográficos como por exemplos de rotas, se for necessário) que podem ser públicas e partilhadas. Quando é feito o carregamento de uma *Webscene* do *CityEngine*, a aplicação criada permite a navegação por toda a cena e a interacção com os modelos presentes.

O primeiro passo deve ser a selecção de todos os componentes a serem exportados. A exportação foi realizada com os parâmetros pré-definidos do *CityEngine*, à excepção da qualidade da textura dos modelos. A alteração deste parâmetro é necessária para que os modelos 3D das amostras surjam com maior qualidade na *Web*, uma vez que a qualidade padrão faz com que os modelos percam demasiada definição. A qualidade foi definida como média. Uma maior qualidade levaria, no caso actual, a que a cena final ficasse com uma dimensão que não permite uma utilização adequada do mapa 3D (o tempo de carregamento da cena na *Web* ficaria mais elevado do que o adequado para o efeito).

<sup>10</sup> <https://www.arcgis.com/home/index.html>

<sup>11</sup> <https://www.esri.com/en-us/home>

A figura 2.26 representa o esquema dos dados e regras utilizadas para a criação do mapa 3D no *CityEngine* antes da sua posterior exportação para a *Webscene* que seria utilizada online.

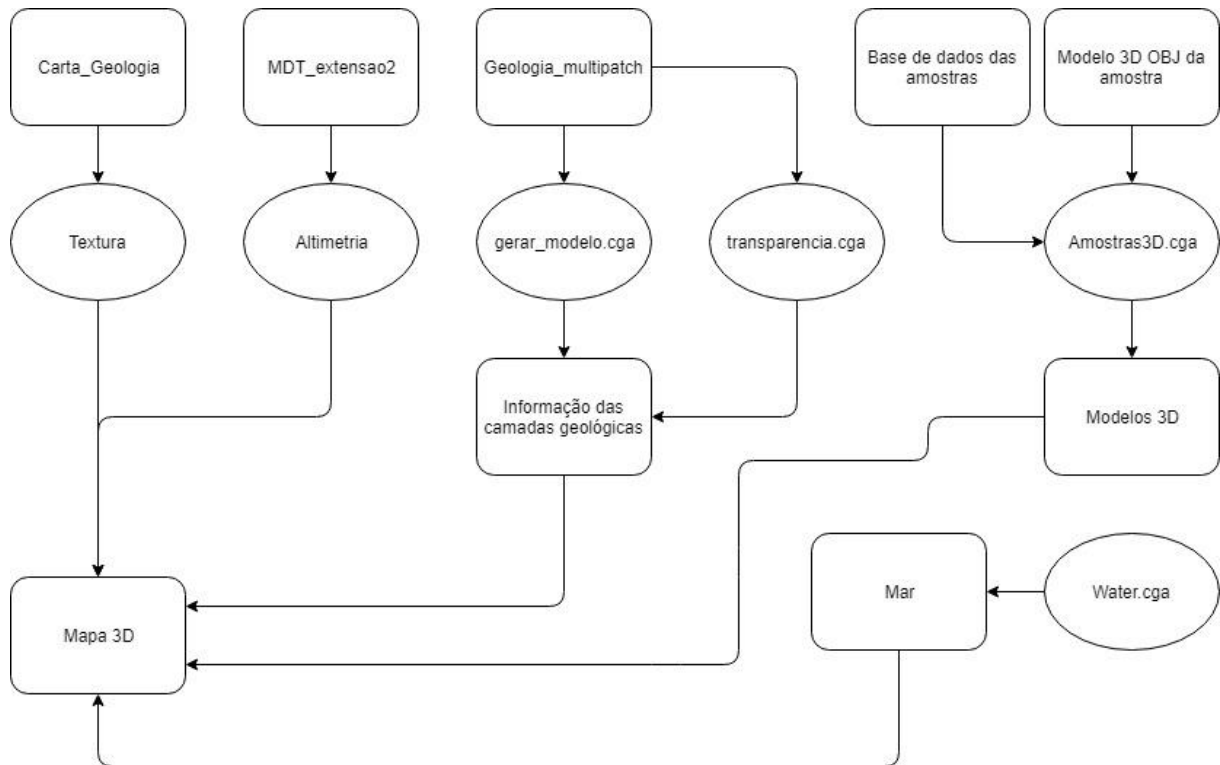


Figura 2.26 Esquema de trabalho e operações para a criação da scene final do mapa 3D (antes da sua exportação)

## 2.9.2 Website wix.com

O *website* criado na plataforma wix.com serve para complementar o Mapa 3D, que não possui todas as ferramentas (interactividade adicional com os modelos 3D) para funcionar independentemente.

Inicialmente foram carregados os modelos 3D em formato OBJ para a plataforma modelo.io. Esta plataforma suporta os modelos 3D e permite criar uma visualização interactiva dos modelos. Após o carregamento do modelo 3D, o visualizador da plataforma modelo.io permite aceder a um código caso se pretenda integrar o modelo noutra página (*embed*). Este código HTML permite apresentar num *website* informação guardada noutra plataforma.

A figura 2.27 contém o esquema da página de cada modelo 3D.

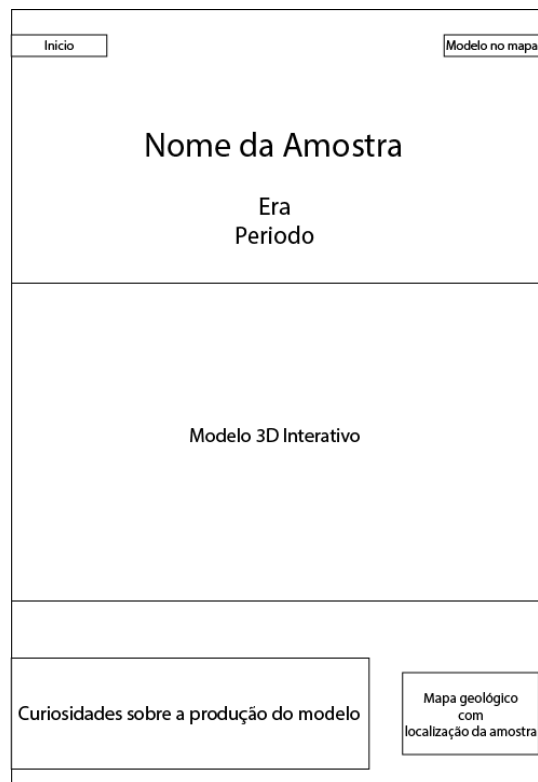


Figura 2.27 Esquema da página de cada modelo do website criado em wix.com

Cada modelo 3D de uma amostra geológica tem uma página própria para a interacção do utilizador, permitindo rodar livremente em todas as direcções, ampliar ou reduzir e fazer translações. Na página é utilizada uma ferramenta onde é inserido o código HTML que veio da plataforma modelo.io. Ao inserir o código, é criado o visualizador do modelo 3D onde é possível explorar a totalidade do modelo.

Além do modelo, a página contém curiosidades sobre o processo de criação do mesmo (como dificuldades ou facilidades que surgiram e também dados estatísticos sobre número de fotos necessárias para a cobertura fotográfica de cada modelo). Foi também utilizado um mapa criado em *ArcMap* onde é identificada a camada geológica de proveniência da amostra e a sua localização geográfica.

No topo superior direito da página do modelo encontra-se o botão, com o nome da amostra em causa, que funciona como um link para o modelo da amostra geológica presente no mapa 3D. No canto superior esquerdo encontra-se o botão Inicio que leva o utilizador à página principal do *website*.

A página inicial do *website* encontra-se esquematizada na figura 2.28.

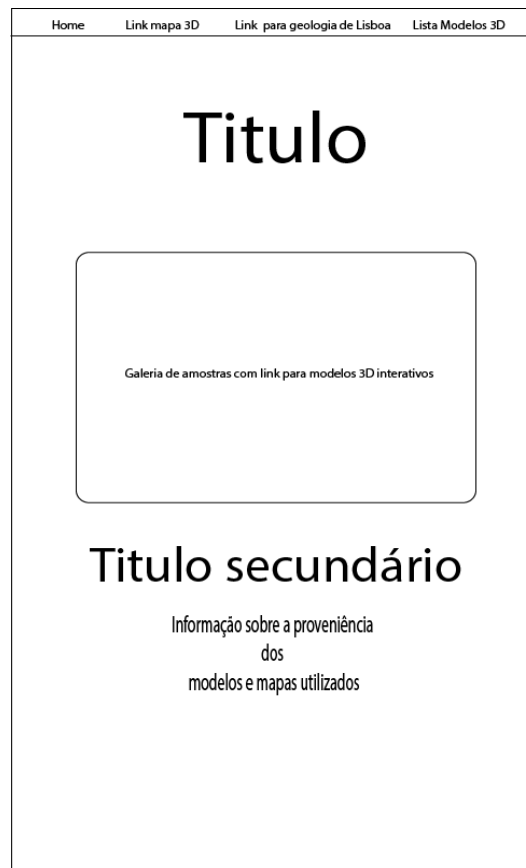


Figura 2.28 Esquema da página inicial do *website* criado em *wix.com*

Esta página contém uma lista de fotografias das amostras onde o utilizador pode seleccionar a amostra com que pretende interagir. Esta lista apresenta uma fotografia de cada vez e passa à seguinte ao fim de um período de 5 segundos. A fotografia apresenta o nome da amostra, para que os utilizadores, que não reconheçam a litologia em causa possam sempre saber qual estão a escolher. No topo do *website* surgem 4 botões. O primeiro, denominado *Home* permite devolver o utilizador sempre à página inicial do *website*. Este botão surge também na página de cada modelo 3D, mas aqui denomina-se Início.

O botão seguinte, Mapa 3D, possui um link directo para a vista inicial do mapa 3D. Esta vista que é apresentada ao utilizador é a mesma que um utilizador recebe se aceder directamente ao mapa 3D através do *ArcGis* online.

O botão Geologia de Lisboa encaminha o utilizador para uma página nova do *website* onde foi colocado um mapa, criado em *ArcMap*, com as formações geológicas vectorizadas. Este mapa tem todas as formações geológicas e falhas identificadas, sendo que as falhas são identificadas com iconografia adequada. O objectivo desta página é dar ao utilizador uma vista desimpedida das principais formações geológicas da área de Lisboa e da sua tectónica.

O último botão, Modelos 3D, apresenta um menu do estilo *DropDown* onde surgem todas as amostras geológicas modeladas. A escolha de qualquer uma das amostras geológicas remete o utilizador para a página do modelo 3D interactivo da mesma. Este botão funciona como complemento à lista principal de amostras geológicas em fotografias sendo que tem como particularidade ser um método mais célere de encontrar a amostra pretendida.

### 3 Resultados

Após a descrição da metodologia utilizada neste projecto segue-se a apresentação dos resultados obtidos.

Os primeiros resultados deste projecto foram a delimitação de formações geológicas em formato digital (*shapefile*) por duas técnicas de vectorização. Os mapas finais serão apresentados em conjunto, de modo, a que as principais diferenças sejam evidentes. Para facilitar a verificação das diferenças ambos os mapas possuem os mesmos elementos complementares, como as falhas (classificadas como *shapefile* mas como linhas enquanto que as camadas são *shapefiles* do tipo polígono) e a cidade de Lisboa.

Uma vez que os produtos finais (*website* e mapa 3D) se encontram em plataformas online, a apresentação destes neste capítulo é feita essencialmente a partir de capturas de ecrã. Os links para cada um dos produtos encontram-se no capítulo dedicados ao mesmo.

Como característica mais proeminente do mapa 3D interactivo surgem os modelos 3D das amostras geológicas. Estes foram posicionados sobre a camada da carte geológica correspondente e foram dimensionados de modo a sobressaírem.

O *website* de divulgação foi criado de modo a ser o mais apelativo possível e ao mesmo tempo fácil de utilizar pois estas características são as que mais interessam aos seus utilizadores futuros. Para a demonstração do *website* neste capítulo foi escolhida a página principal do mesmo e a página do modelo de uma amostra geológica.

#### 3.1 Vectorização e Classificação automática da Carta Geológica

A vectorização interactiva das folhas 34-A, 34-B, 34-C e 34-D da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000 é o primeiro resultado (ainda que não fizesse parte dos objectivos iniciais) do projecto. Problemas nas folhas mencionadas (como a diferenças de cores na mesma camada em folhas diferentes) e a constatação de que a utilização de ficheiros *raster* como textura do Modelo Digital de Terreno (MDT) não permitem que a informação das formações geológicas seja consultável, levaram à necessidade da vectorização das formações geológicas de modo a poder importá-las para o *CityEngine* como modelos 3D (em formato *multipatch*). As duas metodologias adotadas foram já descritas no capítulo 2 e levaram à criação de dois mapas semelhantes. O primeiro mapa (figura 3.1) é o resultante da primeira metodologia. Neste mapa as falhas foram as primeiras a ser vectorizadas seguidas pelas formações geológicas. Esta sequência resulta da estrutura geológica da zona em que a geologia presente à superfície é condicionada pela tectónica local. As falhas delimitam o contacto entre as formações geológicas. Uma vez que a vectorização é interactiva, é importante que os contactos entre as camadas sejam bem desenhados para evitar espaços vazios.

O mapa realizado tentou ser o mais fiel possível à carta geológica. Por esta razão as cores das formações geológicas apresentadas são o mais próximo possível da cor geral do período geológico a que estas pertencem (o código de cores da carta geológica separa as camadas pelo Período geológico a que pertencem).

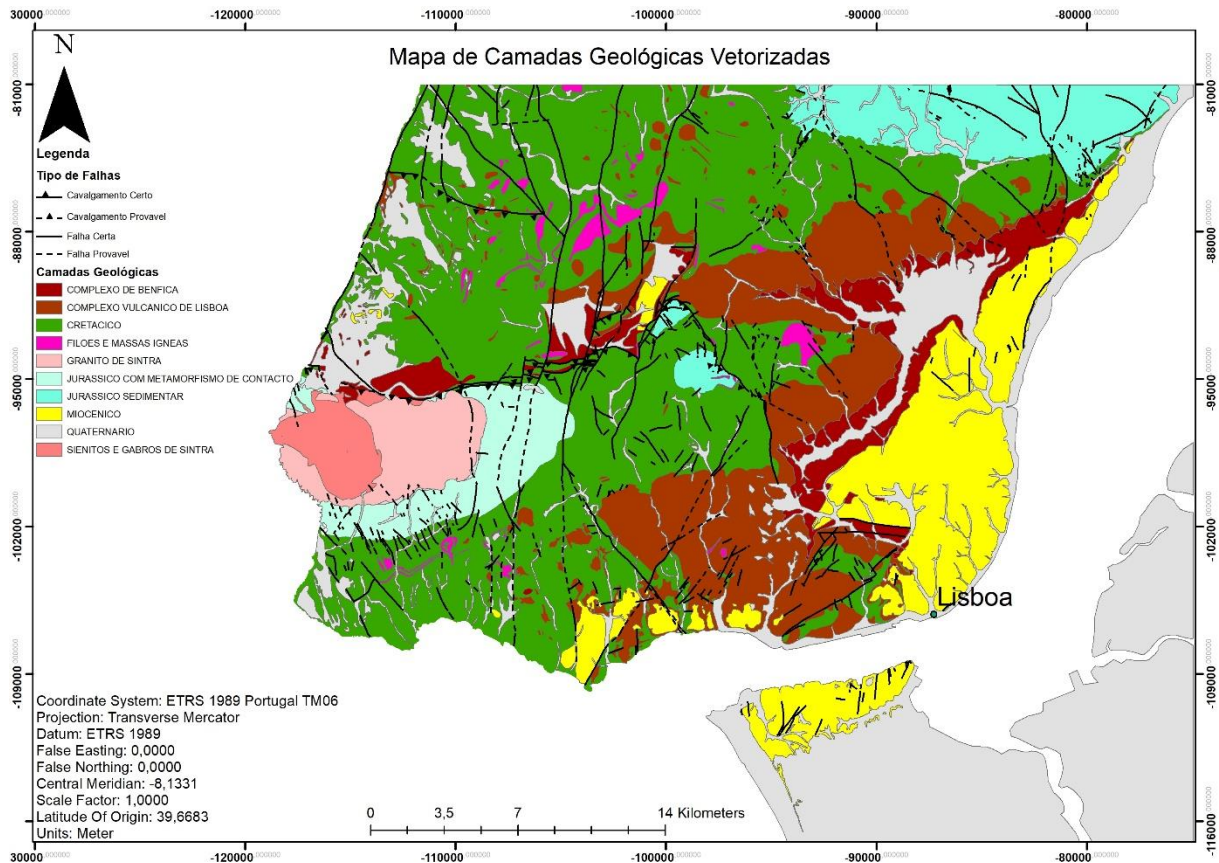


Figura 3.1 Mapa final vectorizado interactivamente com destaque das formações geológicas, falhas geológicas e com a identificação da cidade de Lisboa. Camadas vectorizadas com base nas folhas 34-A, 34-B, 34-C e 34-D da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000

A figura 3.1 aparece ampliada no Anexo 1 para que possa ser mais facilmente consultada.

O segundo produto que se apresenta resultou da segunda metodologia (classificação automática assistida). Para este mapa foram unidas as classificações das 4 folhas da Carta Geológica utilizadas. Para que esta união acontecesse sem percalços, garantiu-se a consistência nos nomes das formações geológicas classificadas.

Após a união das classificações foi necessário trabalho de edição individual para cada camada. Eliminou-se maioritariamente zonas compostas por poucos pixels ao longo do mapa que não correspondem à verdade do terreno. Esta edição levou a que surgissem inúmeros pequenos espaços no interior das camadas geológicas que se notam especialmente na zona Oeste da camada do Cretácico (Verde) visível na figura 3.2. Aqui, além dos espaços correspondentes ao Cretácico, o algoritmo de Classificação captou muitos elementos topográficos que existem nas folhas da Carta Geológica. Além dos elementos topográficos, também as zonas de fronteira das folhas foram, em algumas ocasiões, mal classificadas, o que é visível no mapa da figura 3.2 (Região central a Norte).

Foi colocado sobre este mapa, a *shapefile* das falhas geológicas vectorizadas interactivamente. Com este elemento é possível visualizar que o condicionamento da geologia à tectónica (na superfície do terreno) também se verifica neste método de vectorização automática, o que contribui para a validação da metodologia.

O mapa da figura 3.2 encontra-se ampliado no Anexo 2.

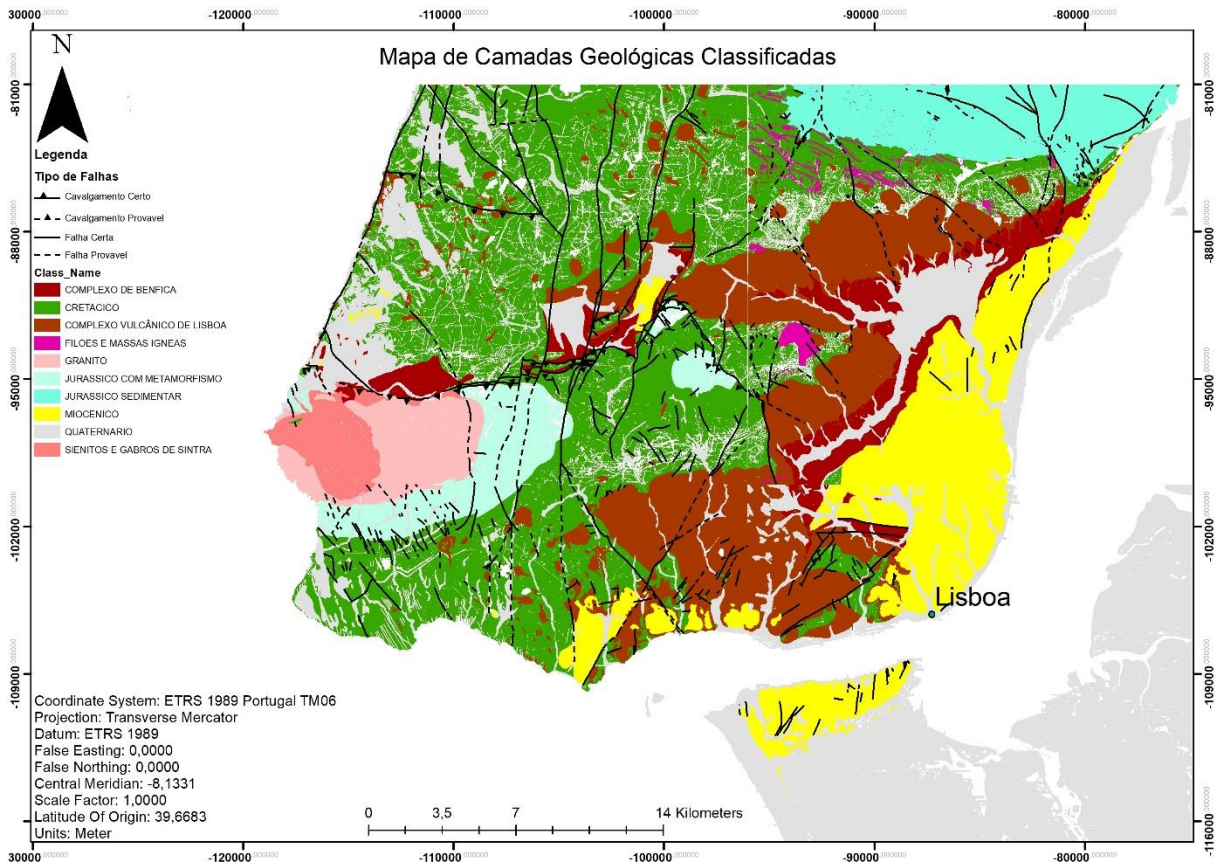


Figura 3.2 Mapa final classificado com recurso ao algoritmo de Maximum likelihood com destaque das formações geológicas, falhas geológicas e com a identificação da cidade de Lisboa. Camadas criadas da classificação das folhas 34-A, 34-B, 34-C e 34-D da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000

Na imagem 3.3 confrontam-se os dois resultados das metodologias aplicadas. Aqui é possível perceber melhor as diferenças entre os mapas.

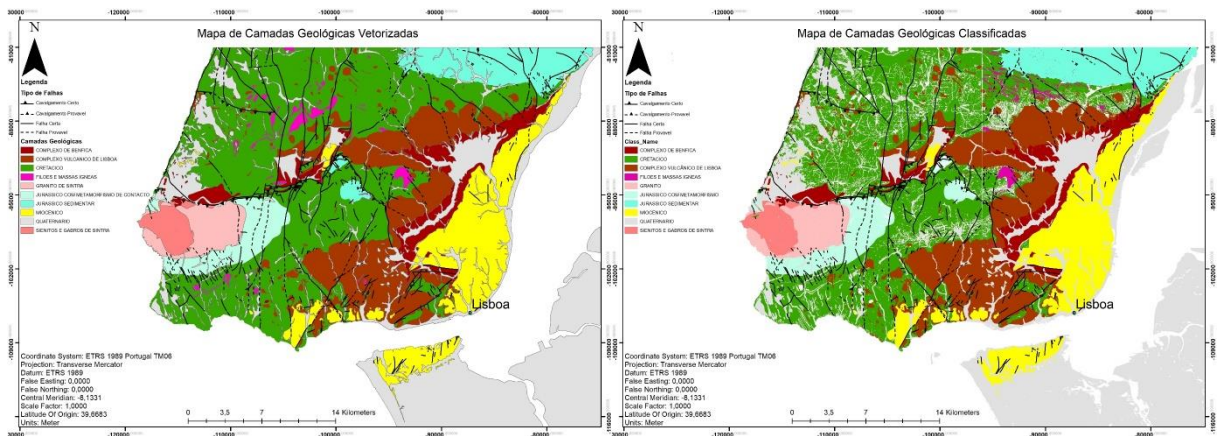


Figura 3.3 Mapas da vectorização interactiva (Esquerda) e da Classificação Automática Assistida (Direita) lado a lado para permitir a comparação das duas metodologias

### 3.2 Mapa 3D interactivo

Para a publicação do mapa 3D na internet foi criada uma conta (Pessoal) na plataforma *ArcGis Online*. Aqui foi alojada a *Webscene* exportada em 2.9.1. Este ficheiro contém todos os elementos do mapa 3D necessários para a criação do mapa. Uma vez que o URL para o mapa 3D era muito grande foi utilizado um serviço online, o Bitly<sup>12</sup> para o encurtar. O link encurtado para o mapa 3D é então:

<https://bit.ly/2BcF2Y3>

De modo a permitir a um utilizador uma visita dinâmica pelo mapa 3D, foi necessário gerar um número de vistas pré-definidas (*bookmarks*) no CityEngine antes de exportar a *Webscene*. Uma vez que a *Webscene* possui as *bookmarks*, ao abrir o mapa 3D na internet é automaticamente criada uma apresentação dinâmica. Esta apresentação vai passando por todos os modelos e apresenta o nome da amostra geológica correspondente. Ela pode ser parada em qualquer momento pelo utilizador, o qual pode, em seguida mover-se pelo modelo interactivamente.

Ao clicar sobre um modelo das amostras geológicas obtém-se uma faixa lateral com a informação que foi adicionada na base de dados dos modelos criada em *ArcGis* referente a esse modelo. Esta informação é importante para que o utilizador possa compreender melhor a rocha que é apresentada. Além desta informação, existe também um link para a página do modelo 3D no *website* criado. A figura 3.4 mostra a faixa com as informações de um dos modelos 3D.

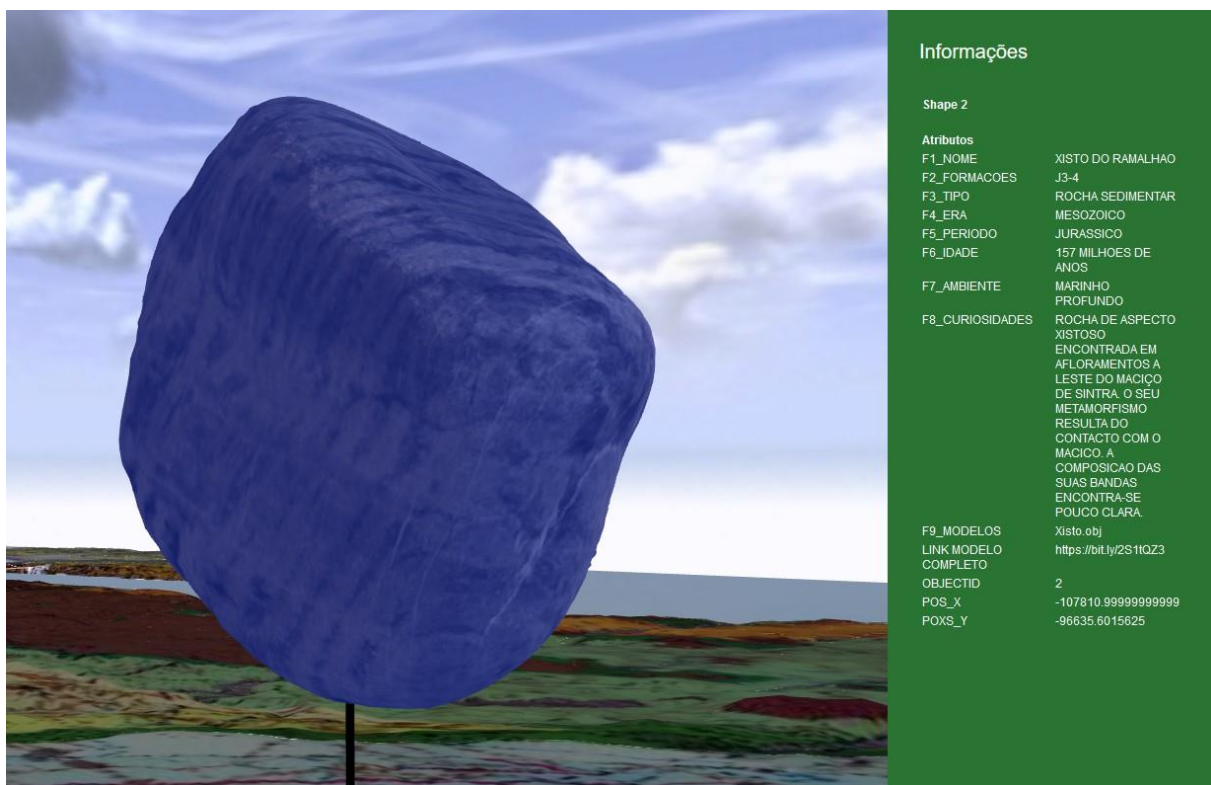


Figura 3.4 Informações da amostra geológica que surgem ao seleccionar o modelo 3D correspondente no mapa 3D

Ao clicar em qualquer ponto da superfície do terreno do mapa 3D vai surgir a informação sobre a camada geológica.

<sup>12</sup> <https://bitly.com/>

Numa primeira fase a única informação disponível é o nome da camada, mas pode ser complementada. É possível disponibilizar esta informação graças ao ficheiro de formato *shapefile* do tipo *Multipatch* que foi adicionado ao mapa 3D com as formações geológicas.

A figura 3.5 mostra as informações da camada geológica seleccionada na superfície do mapa (a cor azul arroxeadada).

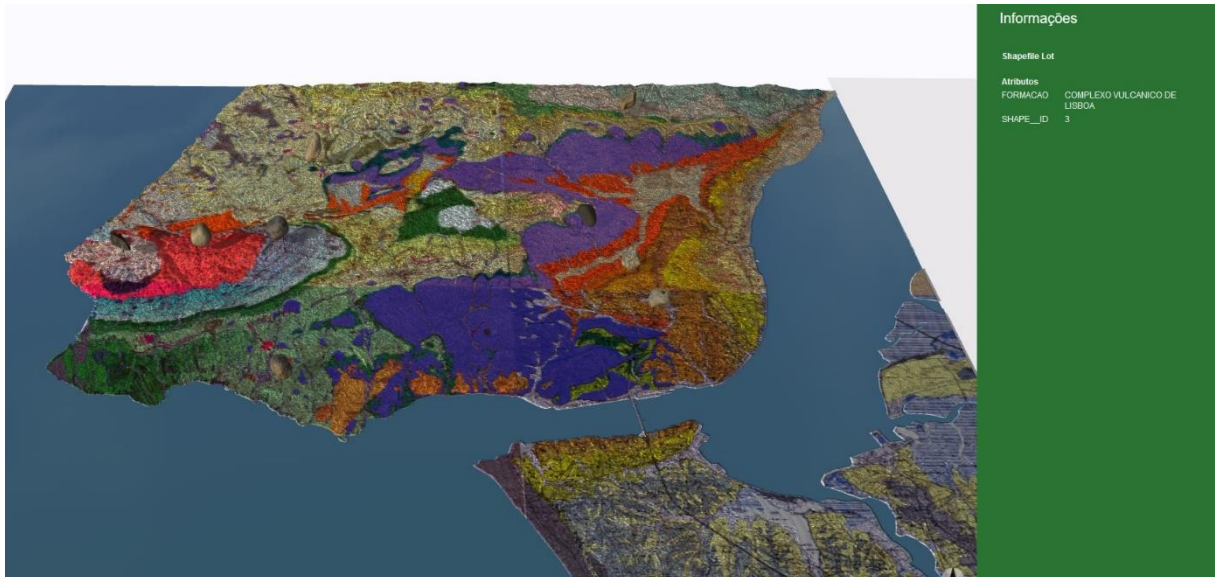


Figura 3.5 Informação sobre a camada geológica que surge ao seleccionar uma camada geológica na superfície do mapa 3D

Nas figuras 3.6 à 3.10 são apresentadas imagens dos modelos 3D criados tal como estes são vistos no mapa 3D interactivo.

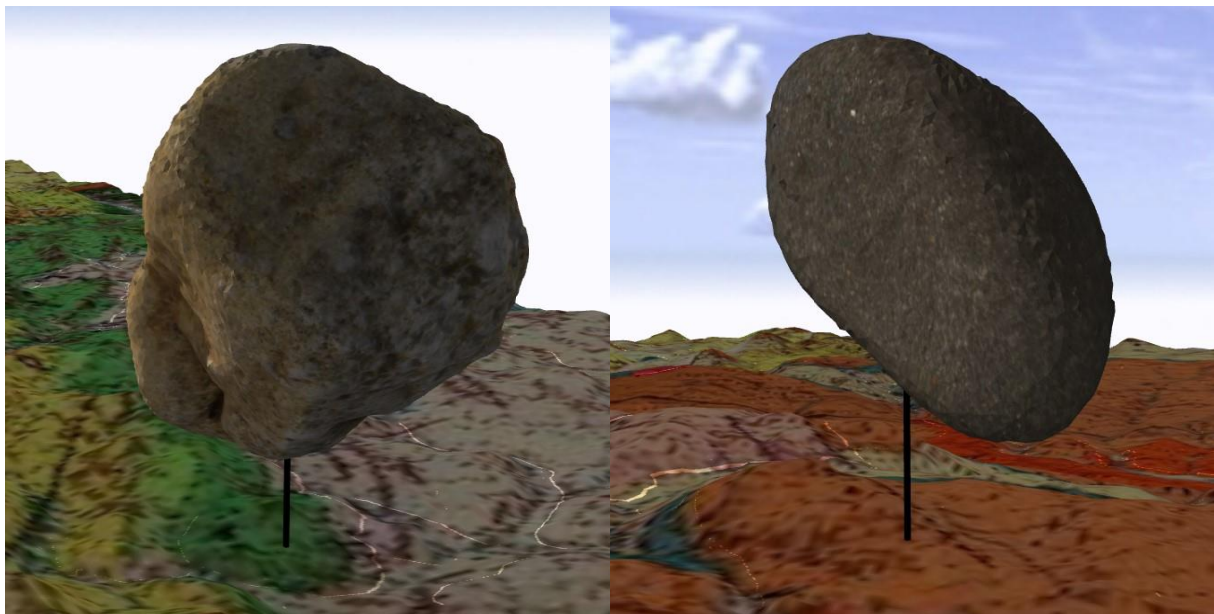


Figura 3.6 Modelos 3D do Arenito (esquerda) e Basalto (direita) no mapa 3D

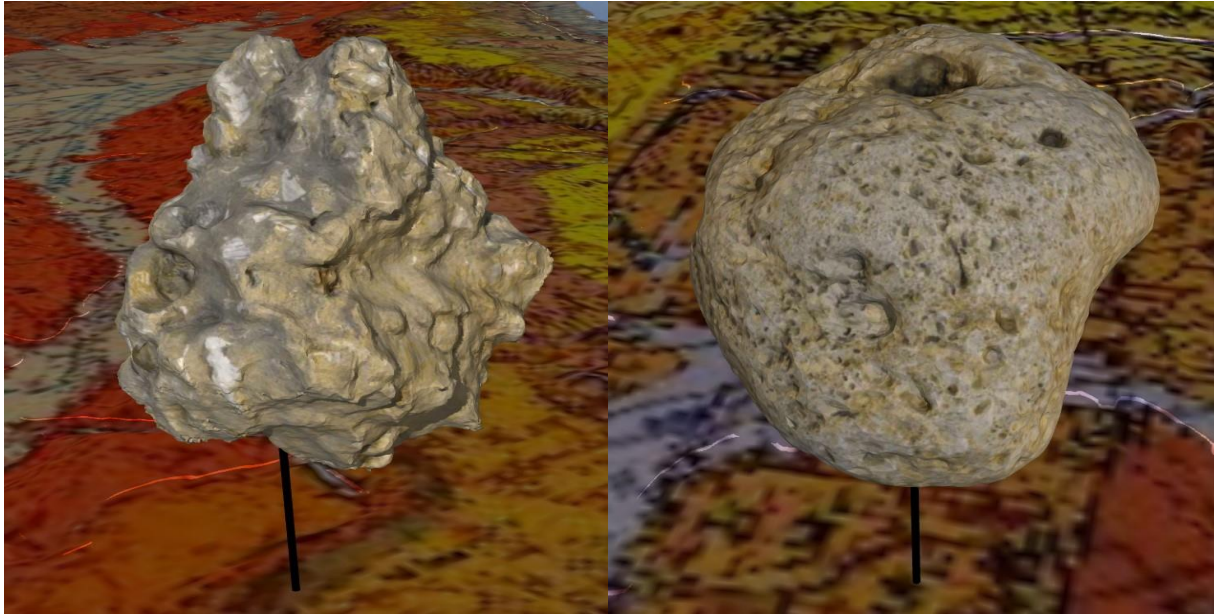


Figura 3.7 Modelo 3D do Biocalcarenito (esquerda) e Calcarenito (direita) no mapa 3D

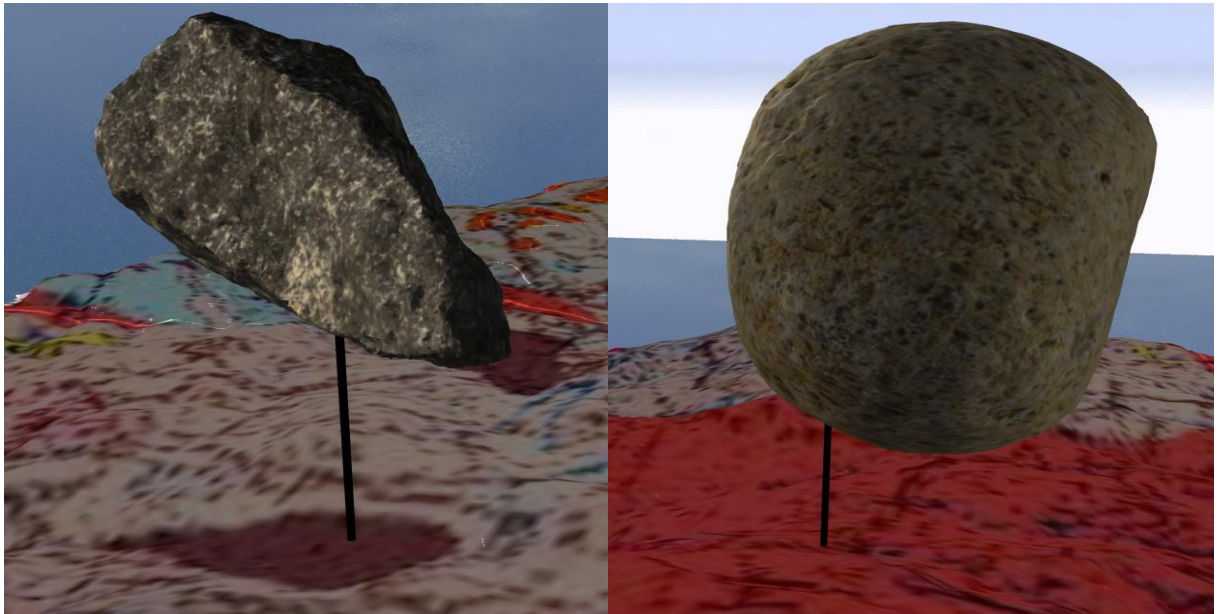


Figura 3.8 Modelos 3D do Gabro (esquerda) e Granito de Sintra (direita) no mapa 3D

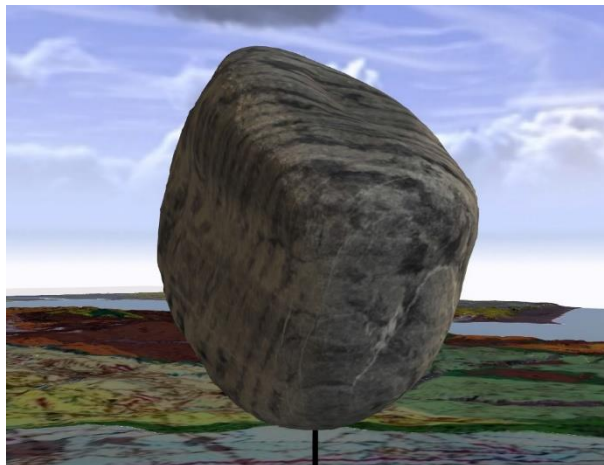


Figura 3.9 Modelo 3D do Xisto do Ramalhão no mapa 3D

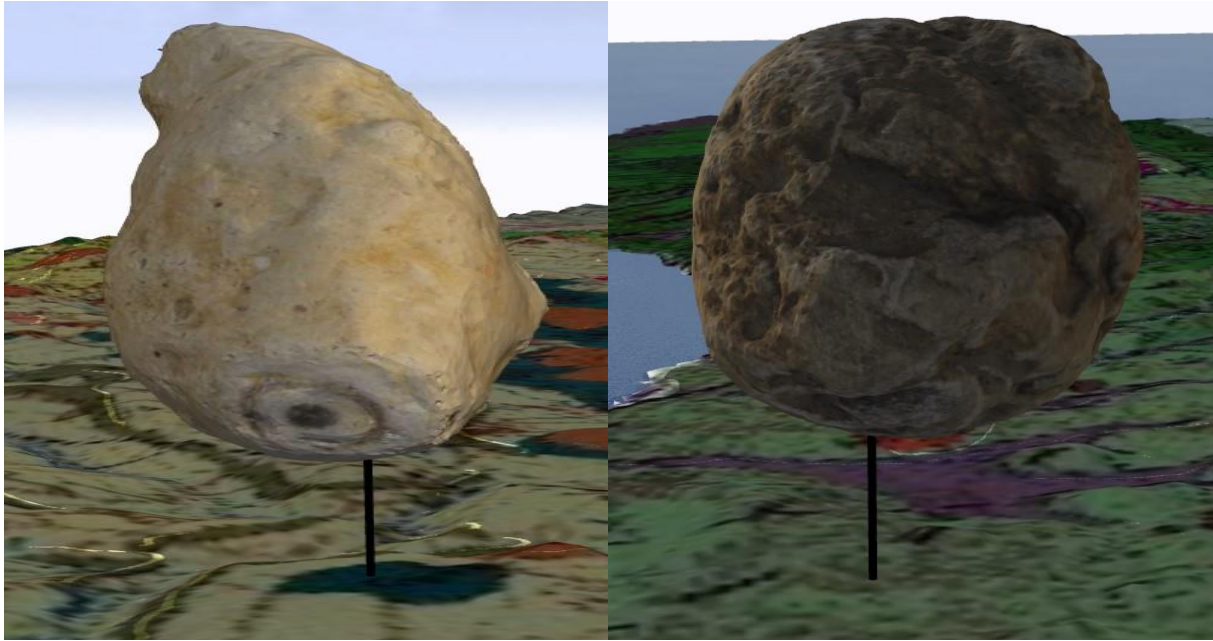


Figura 3.10 Modelos 3D do Calcário de Lios (esquerda) e do Calcário Margoso (direita) no mapa 3D

Uma vista geral do mapa 3D tal como é apresentada aos utilizadores ao entrarem no mesmo é visível na figura 3.11. As informações à direita do mapa descrevem o conteúdo apresentado. Além do conteúdo são também sumariados os principais componentes que constituem o mapa.

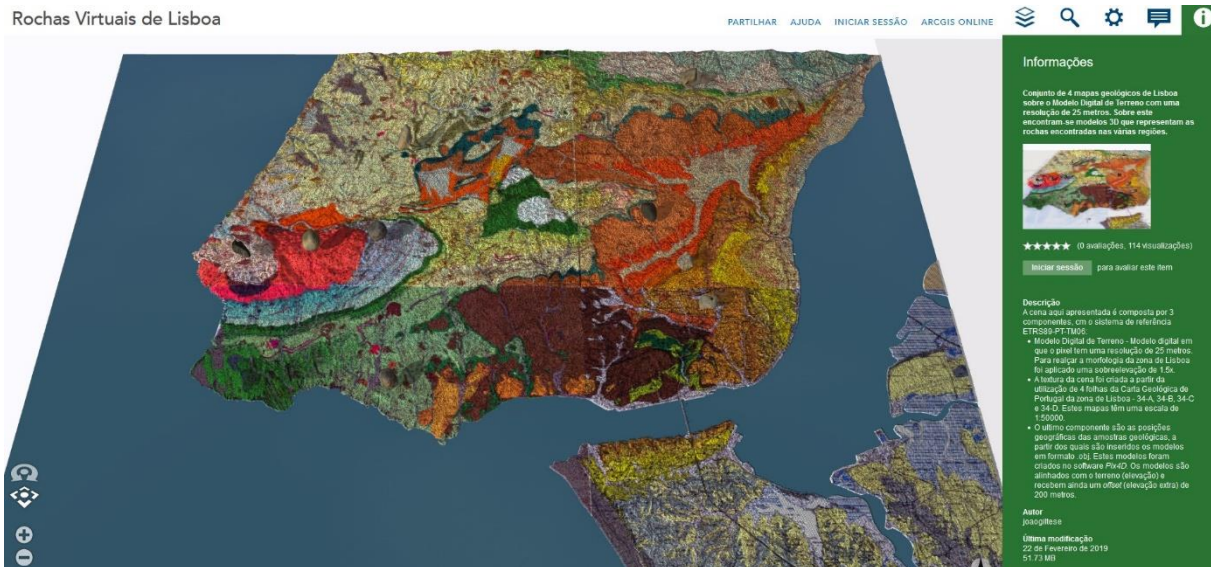


Figura 3.11 Vista Web do mapa 3D

### 3.3 Website de divulgação

O Wix<sup>13</sup> é uma plataforma online que permite que qualquer pessoa, mesmo sem conhecimentos de programação ou desenvolvimento de aplicações web, possa criar um *website*. Esta plataforma disponibiliza todas as ferramentas necessárias para criar vários tipos de projectos na *web*. Como foi referido em 2.9.2, o desenvolvimento do *website* foi feito com recurso a esta plataforma e o seu URL é o seguinte:

<https://joaogil19.wixsite.com/mysite>

A página individual de cada modelo apresenta, como elemento principal, o visualizador do modelo 3D (alojado na plataforma modelo.io). Este visualizador permite explorar o modelo incutindo-lhe rotações de 360°x360°. Existem 5 vistas pré-definidas que podem ser escolhidas. O utilizador pode ainda ampliar tanto quanto a resolução da textura (e do modelo) permitem (figura 3.12).



Figura 3.12 Visualizador do modelo 3D presente no website de divulgação. Assinalado a vermelho as vistas pré-definidas sobre o modelo 3D

A página principal do *website* tem como elemento principal a lista de amostras geológicas, que ocupa a sua parte central. Esta posição de destaque pretende que o utilizador, ao aceder à página visualize directamente o principal elemento divulgado, que são os modelos 3D das amostras geológicas.

<sup>13</sup>Wix.com

A lista de amostras, visível na figura 3.13, apenas exhibe uma fotografia de cada vez. Cada fotografia é acompanhada do nome da amostra e da sua proveniência. Se nada for feito, ao fim de 5 segundos a fotografia é automaticamente alterada para a da amostra seguinte.

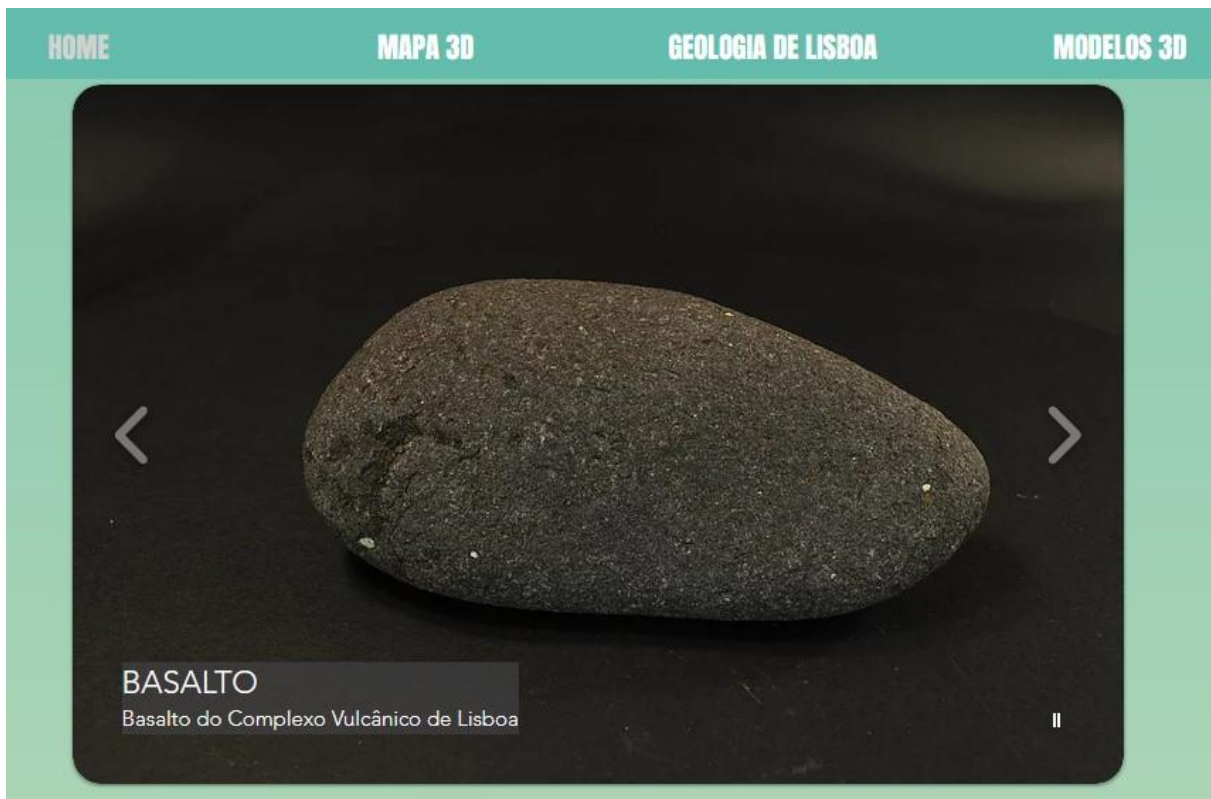


Figura 3.13 Lista de amostras geológicas que surge na página principal do website

Por baixo da lista surge um pequeno texto com informação sumária sobre o projecto que deu origem ao website (figura 3.14).

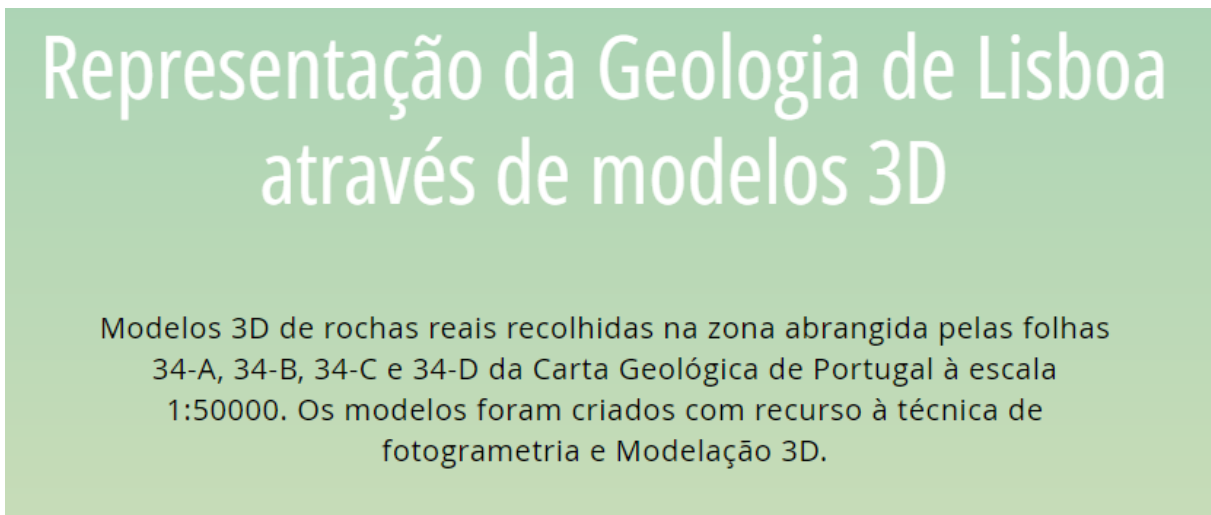


Figura 3.14 Informações sobre o projecto que surgem imediatamente abaixo da lista de amostras geológicas no website de divulgação

No topo da página principal encontram-se os 4 botões que foram descritos em 2.9.2 (figura 3.15).



Figura 3.15 Barra de botões no topo do website de divulgação

O botão *HOME* permite o retorno do utilizador à página principal. *MAPA 3D* devolve o utilizador à página do *Web* do mapa 3D. *GEOLOGIA DE LISBOA* permite que o utilizador visualize a página com o mapa geológico construído a partir das formações geológicas e das falhas vectorizadas (figura 3.16).

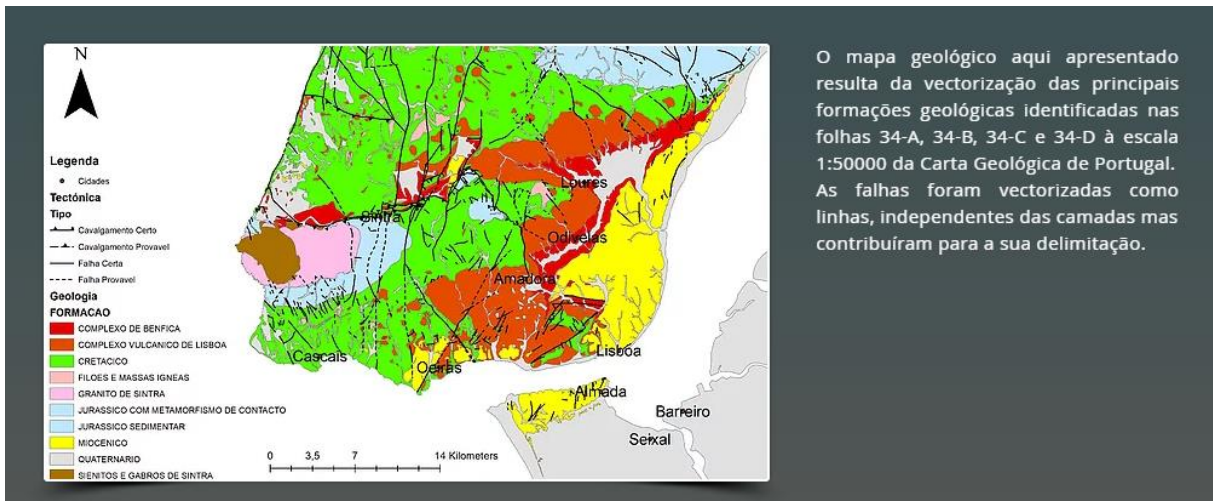


Figura 3.16 Página do mapa geológico criado, utilizando as formações geológicas vectorizadas no website

O último botão, *MODELOS 3D*, contém um menu em lista (*dropdown*) (figura 3.17) que permite um mais célere acesso aos modelos de amostras geológicas.



Figura 3.17 Menu em lista (*dropdown*) das amostras geológicas no website de divulgação

Por fim, apresenta-se na figura 3.18 a disposição final da página inicial e da página de um dos modelos, tal como esta é visível para o utilizador.



Figura 3.18 Vistas do utilizador do website de divulgação. Página principal (esquerda); Página de um modelo 3D (direita)

## 4 Conclusão

A utilização dos modelos 3D no mapa 3D interactivo é um modo apelativo de apresentar a geodiversidade que existe numa área. No entanto este tipo de produto apresenta inconvenientes. O maior destes será a dimensão dos dados, uma vez que o mapa com todos os modelos que terão de ser carregados para a plataforma *ArcGis online* tem normalmente uma dimensão significativa. A plataforma tem um espaço limitado, sobretudo se o utilizador for privado.

Os componentes da *scene* são: o mapa de altimetria, a textura (4 folhas da Carta Geológica de Portugal), os modelos das formações geológicas e os 9 modelos 3D correspondentes às 9 amostras utilizadas. Após o mapa ter sido criado no *CityEngine*, a *scene* deverá ser exportada para um ficheiro *Webscene* (como foi descrito em 2.9.1). Durante o processo de criação da *Webscene* é possível alterar a qualidade com que os modelos são exportados. Este passo é o que mais afecta o tamanho final do ficheiro.

Um exemplo é a diferença de tamanho entre uma *Webscene* com qualidade de exportação média e outra com qualidade de exportação máxima. A *scene* com qualidade média ocupa aproximadamente 27Mb enquanto que a *scene* com qualidade máxima ocupa 160Mb.

Este aspecto é relevante pois o carregamento da *Webscene* no *ArcGis Online* implica o carregamento da informação por inteiro de cada vez que um utilizador abra o mapa 3D, levando, por vezes demasiado tempo. Além desta situação, também se verifica que quanto maior for o tamanho dos modelos mais dificuldade existe na manipulação e exploração do mapa nos computadores onde esta é feita prejudicando a dinâmica da cena 3D. Decidiu-se que o melhor seria encontrar um compromisso entre a qualidade do modelo e o tamanho da *Webscene*. Os modelos dentro da *Webscene* foram então exportados com qualidade média. Com esta qualidade, a textura e a superfície do modelo são perfeitamente adequados à visualização e interpretação das amostras dentro do mapa 3D.

Apesar da boa qualidade dos modelos no mapa, estes não são livremente manipuláveis. O mapa com os modelos já possui um considerável valor didáctico para a divulgação da geologia, mas se existisse uma maneira de haver uma maior interacção entre o utilizador e o modelo da amostra, esse valor aumentaria. Para isso, foi criado também o *website*, como complemento do mapa 3D.

Os modelos 3D gerados encontram-se armazenados na plataforma [modelo.io](http://modelo.io) que permite, de forma gratuita, mas limitada, alojar os modelos e utilizar o seu visualizador em outros *websites*. A interacção conseguida com a adição do *website* é agora completa. A criação do *website* permite ainda que possam ser adicionadas outras informações sobre os modelos criados bem como mapas 2D que mostram a localização das amostras. No futuro o *website* é a ferramenta mais facilmente escalável e que poderá permitir novas adições a este projecto.

Apesar do *website* ter sido pensado como complemento ao mapa 3D pode também ser utilizado como um produto único uma vez que a sua página inicial foi desenhada para ter uma exposição de todas as amostras utilizadas, com a possibilidade de serem carregadas mais se necessário. Um intuito importante deste projecto era garantir a interoperabilidade entre os dois produtos: o mapa 3D e o *website* informativo. A interoperabilidade é realmente o que permite que o projecto atinja o objectivo de divulgação das rochas da região de Lisboa a partir dos modelos 3D. Cada produto individualmente não conseguiria ter o impacto que ambos conseguem uma vez que a ambos falta algum aspecto que o outro possui (ou a interacção com as amostras ou a visualização 3D de todas as zonas em que a amostra se situa).

É possível, com recurso às novas tecnologias, ajudar a divulgar a cultura científica de uma maneira atractiva para o público em geral. Este projecto pretendeu criar um veículo de divulgação das geociências atractivo e educativo.

No início do projecto verificou-se que o *software Pix4D* não tinha sido utilizado para modelar amostras geológicas a esta escala. No entanto, utilizando outro programa já foi criado um projecto com amostras geológicas semelhante a este. O programa utilizado faz uso do mesmo algoritmo de modelação 3D. Muitas ferramentas de modelação 3D são ainda utilizadas nas geociências principalmente para a modelação de áreas em que o acesso ao local é arriscado.

Existindo poucos projectos semelhantes, o projecto das “Rochas Virtuais de Lisboa” torna-se importante para mostrar aquilo que pode ser feito com as tecnologias existentes e estimular outros cientistas ou curiosos do tema a utilizar as ferramentas para divulgar as geociências e chegar a uma audiência cada vez maior. Este projecto mostrou também que plataformas como esta podem ser criadas para ajuda no ensino das geociências e chegar eventualmente a escolas não dotadas de coleções geológicas.

Uma parte importante deste projecto consistiu em testar o *software Pix4D* para modelação virtual de amostras geológicas em 3D. Apesar das principais aplicações do *software* não envolverem modelos de tão pequena escala, este revelou-se perfeitamente adequado para a tarefa.

A primeira fase, em que se modelam as amostras, não é simples pois exige algumas iterações até se conseguirem resultados satisfatórios.

As amostras modeladas em 3D têm, inadvertidamente, outra finalidade: a de preservar amostras geológicas pela existência de cópias digitais das mesmas. As técnicas descritas podem permitir a preservação de cada vez mais amostras ou dar ao público e comunidades científicas a possibilidade de ver amostras geológicas de coleções privadas ou que estejam guardadas, sem local para serem expostas. Além da divulgação, esta é uma área de grande interesse para a modelação 3D, uma vez que é possível num único computador armazenar milhares de modelos de amostras, que de outra maneira poderiam continuar guardadas em armazéns sem poderem ser observadas.

A vectorização das formações geológicas da área correspondente a 4 folhas da carta geológica de Portugal foi outro subproduto deste projecto. Foram estudados dois procedimentos diferentes para conseguir esta vectorização. O primeiro foi a vectorização simples, a partir da carta geológica, desenhando as camadas interactivamente, unindo as camadas pelas categorias definidas. Este procedimento é, no entanto, muito longo, mas tem a vantagem de permitir a edição de problemas existentes nas folhas da carta geológica.

O segundo procedimento permite a vectorização de uma forma automática, através de um algoritmo de classificação assistida de imagens, o *Maximum Likelihood*. A classificação através deste procedimento é significativamente mais rápida. Cada folha da carta geológica foi classificada numa questão de minutos. No entanto, foi necessário mais algum tempo para criar as zonas de treino e teste e existe a desvantagem de cada folha ter de ser classificada individualmente ou até a folha poder ter de ser dividida para poder ser classificada.

Os resultados da classificação (que nunca vão representar a 100% a verdade do terreno) requerem trabalho de edição. Esta etapa pode ser de maior dificuldade para pessoas sem experiência em Sistemas de Informação Geográfica.

Por isso, conclui-se que nesta etapa o ideal é que pessoas com pouca experiência realizem uma vectorização interactiva simples das formações geológicas, enquanto que utilizadores com mais experiência ou em área extensas, realizem uma classificação assistida com edição posterior dos resultados.

O Mapa 3D é simples de criar a partir do *software CityEngine* e gerou um produto com um efeito visual agradável e que permite facilmente a navegação e interacção com os modelos nele contidos. Contudo a interacção com os modelos não é perfeita e por esta razão foi criado o *website* de divulgação. Este complementa o mapa 3D e permite a interacção desejada com os modelos. Esta interacção será uma das características que mais cativa os utilizadores, logo seria sempre desejado que existisse.

Caso surja a possibilidade de adicionar novas amostras ao projecto é possível através do *website* que está preparado para esta possibilidade.

O *website* permite ainda a adição de novas funcionalidades como novas escalas de visualização dos modelos (mineralógica, microscópica ou ao nível da estrutura química dos minerais) que será importante para a expansão futura do projecto. No mapa 3D, no entanto, este processo é mais complexo, uma vez que se torna necessário adicionar as amostras à base de dados criada e posteriormente ao mapa em si.

Este projecto foi desenvolvido para uma área relativamente pequena (Lisboa e envolventes) mas pode ser facilmente escalável para uma área de maiores dimensões. É possível utilizar modelos digitais de elevação de uma área ainda maior que a já utilizada e também cartas geológicas de outras escalas, ou um maior número de cartas. O processo de criação de modelos de amostras geológicas é, com algumas particularidades, semelhante para grande parte das amostras, o que torna possível a criação rápida de um grande número de modelos, dada uma metodologia eficaz. Também o procedimento desenvolvido para a vectorização das cartas geológicas contribui para o escalamento do projecto uma vez que foi verificado que a classificação automática assistida permite rapidamente fazer a vectorização. Com estas adaptações é possível criar um mapa 3D de uma área consideravelmente maior que a deste projecto. Em relação ao *website* e à base de dados, estes, uma vez criados permitem que sejam adicionados mais modelos e informação, sendo por isso produtos facilmente escaláveis.

Em relação à possibilidade de o projecto desenvolvido poder ser utilizado no ensino, esta continua a ser uma possibilidade. No entanto, o público escolar alvo teria de ser avaliado. Como já referido na introdução, alunos muito novos poderiam não compreender completamente toda a informação adicional aos modelos 3D que existe e ficarem apenas pela observação e possivelmente a interpretação dos modelos. Para estes alunos existe a possibilidade de no futuro adaptar tanto o Mapa 3D como o *website* para níveis de ensino específicos. Esta é uma possibilidade que poderá ser estudada para o futuro. Alunos mais velhos, no entanto, poderão fazer melhor uso de toda a informação disponibilizada e utilizar completamente os recursos.

O *software CityEngine* é utilizado para a modelação de ambientes urbanos. A sua utilização para a criação de um mapa geológico interactivo levantou problemas cuja solução ainda não existia e teve de ser criada. A utilização do ficheiro *multipatch* foi uma dessas soluções, conseguindo-se que um utilizador do mapa 3D na *Web* possa saber, com um *click* sobre o mapa, a camada geológica representada no local.

## 5 Propostas de melhoria

Sendo este projecto único na divulgação da diversidade de rochas existentes na zona de Lisboa, existe margem de progressão para melhorar o trabalho já realizado.

A primeira proposta de melhoria será a inclusão de um maior número de amostras no projecto. O número de amostras é reduzido para toda a diversidade que existe na região. Limitar a divulgação geológica a um tão reduzido número de amostras foi complicado uma vez que existem sempre mais amostras que “mereciam” ser divulgadas. O número de amostras escolhido neste projecto prendeu-se com constrangimentos temporais e com a disponibilidade imediata das amostras escolhidas. Seria, também, complicado produzir mais que nove amostras com o tempo que existia para a entrega do relatório do projecto. Seria interessante a criação de mais modelos, desde que com tempo para que estes tenham qualidade.

Outra proposta que seria interessante explorar seria a de aumentar as capacidades dos modelos. Isto é, actualmente os modelos 3D produzidos possuem capacidades “limitadas” de exploração. O *website* permite que o modelo seja explorado em 360° em todas as direcções, mas apenas para visualizar a superfície do modelo. Como forma de aumentar as capacidades do modelo, foram discutidas as possibilidades de adicionar informações sobre a mineralogia e composição química de cada amostra. Uma forma de apresentar a mineralogia seria a de, ao ampliar sobre a superfície duma amostra, a visualização mudasse para um pequeno vídeo de uma lâmina delgada em microscópio petrográfico dessa mesma amostra. Sob um microscópio petrográfico é possível identificar os minerais individuais de uma amostra geológica. Este tipo de vista é pouco conhecida do público geral e seria uma boa hipótese para que este mesmo público conheça melhor como se realiza o estudo geológico.

Ainda uma outra hipótese que colmataria a anterior, seria a construção de modelos da estrutura cristalina de cada um dos minerais que constituem uma amostra. A construção destes modelos não apresentaria dificuldades maiores uma vez que a estrutura cristalina de todos os minerais é conhecida, sendo apenas necessário o conhecimento da utilização de *software* para a construção dos modelos. A implementação destas ideias seria feita no *website* onde seria fácil a sua colocação.

## 6 Bibliografia

*Introduction to ISO in Photography*. [Online]

Available at: <https://photographylife.com/what-is-iso-in-photography>

[Acedido em 10 Janeiro 2019].

*Understanding Depth of Field*. [Online]

Available at: <https://photographylife.com/what-is-depth-of-field>

[Acedido em 10 Janeiro 2019].

ArcCatalog, 2018. *ESRI*. [Online]

Available at: [http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/using-arccatalog/what-is-arccatalog-.htm](http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/using-arccatalog/what-is-arcatalog-.htm)

[Acedido em 22 Janeiro 2019].

ArcMap, 2019. *ESRI*. [Online]

Available at: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/>

[Acedido em 23 Janeiro 2019].

Bistacchi, A. et al., 2015. Photogrammetric digital outcrop reconstruction, visualization with textured surfaces, and three-dimensional structural analysis and modeling: Innovative methodologies applied to fault-related dolomitization (Vajont Limestone, Southern Alps, Italy). *Geosphere v.11 no.6*, p. 2031–2048.

Car, M., Kačunić, D. J. & Kovačević, M.-S., 2016. Application of Unmanned Aerial Vehicle for Landslide Mapping. *SIG 2016 – International Symposium on Engineering Geodesy*, 20-22 Maio, pp. 549-559.

CityEngine, 2019. *ESRI*. [Online]

Available at: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/esri-cityengine/overview>

[Acedido em 23 Janeiro 2019].

Cohen, F., Taslidere, E., Liu, Z. & Muschio, G., 2011. *Virtual Reconstruction of Archaeological Vessels using Expert Priors and Surface Markings*, s.l.: s.n.

Cohen, K., Harper, D. & Gibbard, P., 2018. *ICS International*. [Online]

Available at: [www.stratigraphy.org](http://www.stratigraphy.org)

[Acedido em 13 Setembro 2018].

ENVI, 2019. *Harris Geospatial Solutions*. [Online]

Available at: <https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI>

[Acedido em 23 Janeiro 2019].

ESRI, s.d. *Esri Community*. [Online]

Available at: <https://community.esri.com/thread/115222>

[Acedido em 21 Janeiro 2019].

Franceschi, M. et al., 2015. Integration of 3D modeling, aerial LiDAR and photogrammetry to study a synsedimentary structure in the Early Jurassic Calcarei Grigi (Southern Alps, Italy). *European Journal of Remote Sensing*, pp. 527-539.

- Gonçalves, J. A., s.d. *Dados altimétricos para Portugal*. [Online]  
Available at: <http://www.fc.up.pt/pessoas/jagoncal/srtm/>  
[Acedido em 21 Setembro 2018].
- Guerin, A. et al., 2015. Common problems encountered in 3D mapping of geological contacts using high-resolution terrain and image data. *European Journal of Remote Sensing*, pp. 661-672.
- L.Rebêlo, et al., 2011. *Notícia explicativa da folha 34-B Loures*. Lisboa: s.n.
- LNEG, s.d. *Download de Cartografia Geológica à escala 1:50000*. [Online]  
Available at: <http://geoportal.lneg.pt/geoportal/egeo/DownloadCartas/>  
[Acedido em 4 Janeiro 2019].
- Matildes, R., 2016. *Técnicas de teledetecção de alta resolução aplicadas à monitorização 3D de arribas litorais: adequabilidade, modelação da informação e resultados*, s.l.: s.n.
- NASA, s.d. *NASA 3D Resources*. [Online]  
Available at: <https://nasa3d.arc.nasa.gov/models>  
[Acedido em 20 Janeiro 2019].
- Pais, J. et al., 2006. *Notícia explicativa da folha 34-D Lisboa*. Lisboa: s.n.
- Paor, D. G. D., 2016. Virtual Rocks. *GSA Today*, Agosto, pp. 4-11.
- Pix4D, 2019. [Online]  
Available at: <https://www.pix4d.com/>  
[Acedido em 23 Janeiro 2019].
- Pix4D, s.d. *3D Textured Mesh*. [Online]  
Available at: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/208194103>  
[Acedido em 20 Janeiro 2019].
- Pix4D, s.d. *How to export the Triangle Mesh*. [Online]  
Available at: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/212218463-How-to-export-the-Triangle-Mesh->  
[Acedido em 20 Janeiro 2019].
- Ramalho, M. et al., 1993. *Notícia explicativa da folha 34-A Sintra*. Lisboa: s.n.
- Ramalho, M. et al., 2001. *Notícia explicativa da folha 34-C Cascais*. Lisboa: s.n.
- Remondino, F., Guarnieri, A. & Vettore, A., 2004. 3D modeling of Close-Range Objects: Photogrammetry or Laser Scanning. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Dezembro.
- Roncella, R., Forlani, G. & Remondino, F., 2004. Photogrammetry for geological applications: Automatic retrieval of discontinuity orientation in rock slopes. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Dezembro.
- Smithsonian Institution, s.d. *Smithsonian 3D collection*. [Online]  
Available at: <https://3d.si.edu/>  
[Acedido em 19 Janeiro 2019].

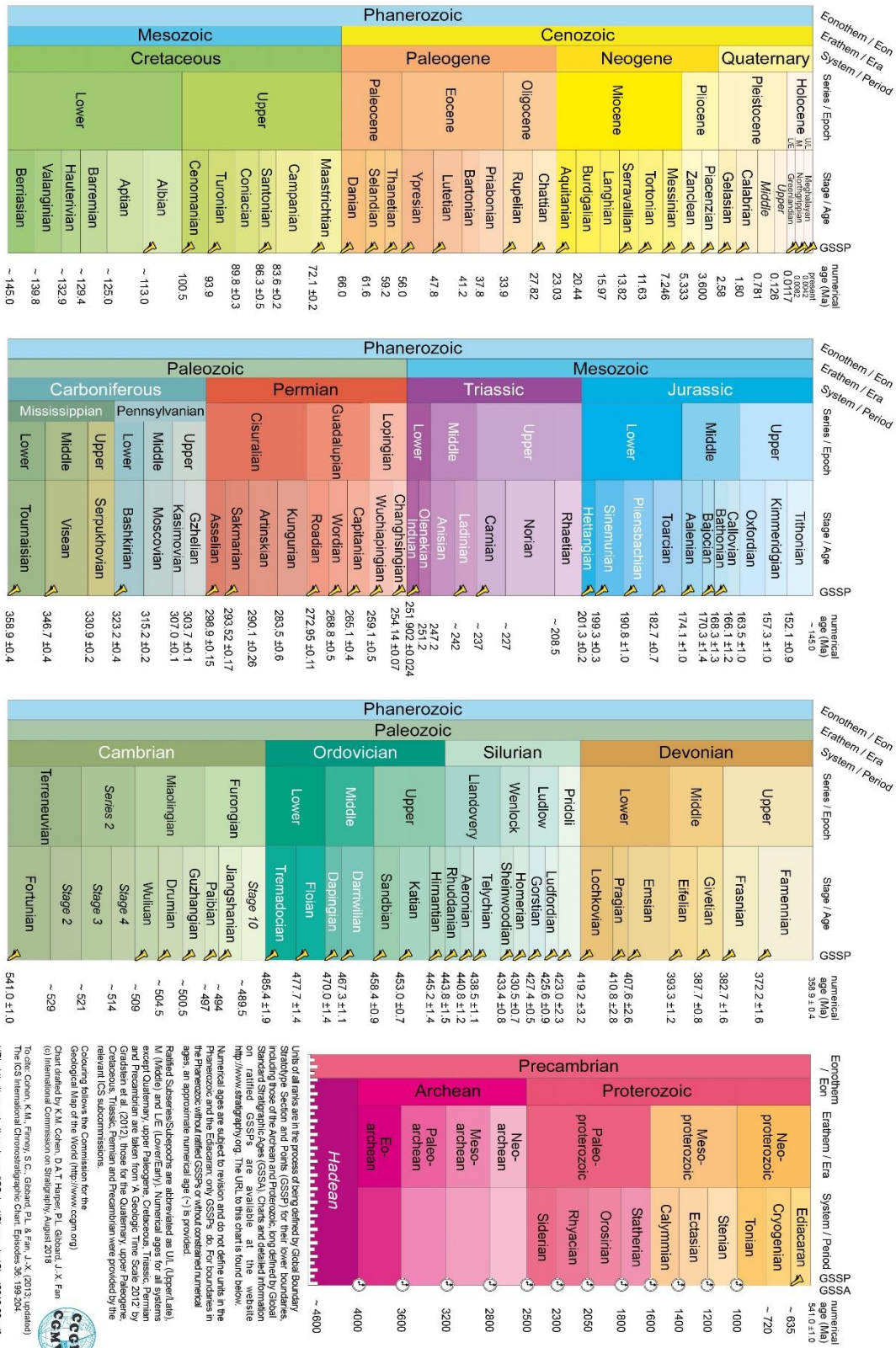
Squelch, A., 2018. 3D printing rocks for geo-educational, technical, and hobbyist. *GEOSPHERE*; v. 14, no. 1, pp. 360-366.

Tannant, D. D., 2015. Review of Photogrammetry-Based Techniques for Characterization. *International Journal of Geohazards and Environment*, pp. 76-87.

Terrinha, P. et al., 2017. Gravimetric and magnetic fabric study of the Sintra Igneous complex:. *International Journal of Earth Sciences*, 14 Dezembro, p. 1807–1833.

# 7 Anexos

## 7.1 Anexo 1 Tabela Cronoestratigráfica




  
**INTERNATIONAL CHRONOSTRATIGRAPHIC CHART**
  
 v 2018/08

[www.stratigraphy.org](http://www.stratigraphy.org)
  
 International Commission on Stratigraphy



Figura 7.1 Tabela Cronoestratigráfica utilizada na componente geológica do projecto. Versão 08/2018 vigente a quando da elaboração do projecto

7.2 Anexo 2 – Mapa final vetorizado interactivamente

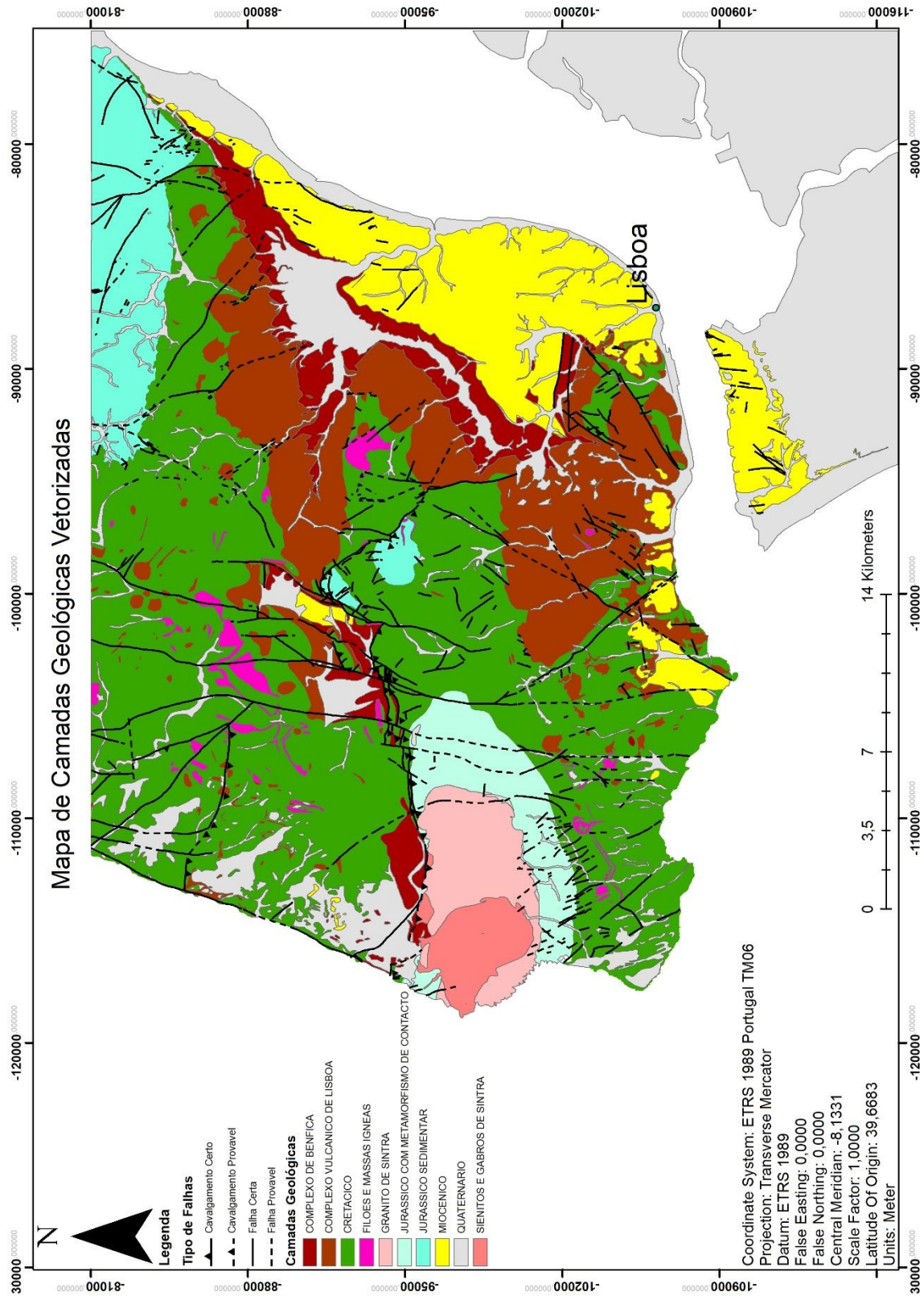


Figura 7.2 Mapa final vetorizado interactivamente com destaque das formações geológicas, falhas geológicas e com a identificação da cidade de Lisboa (Expandido)

7.3 Anexo 3 – Mapa final vetorizado por classificação assistida

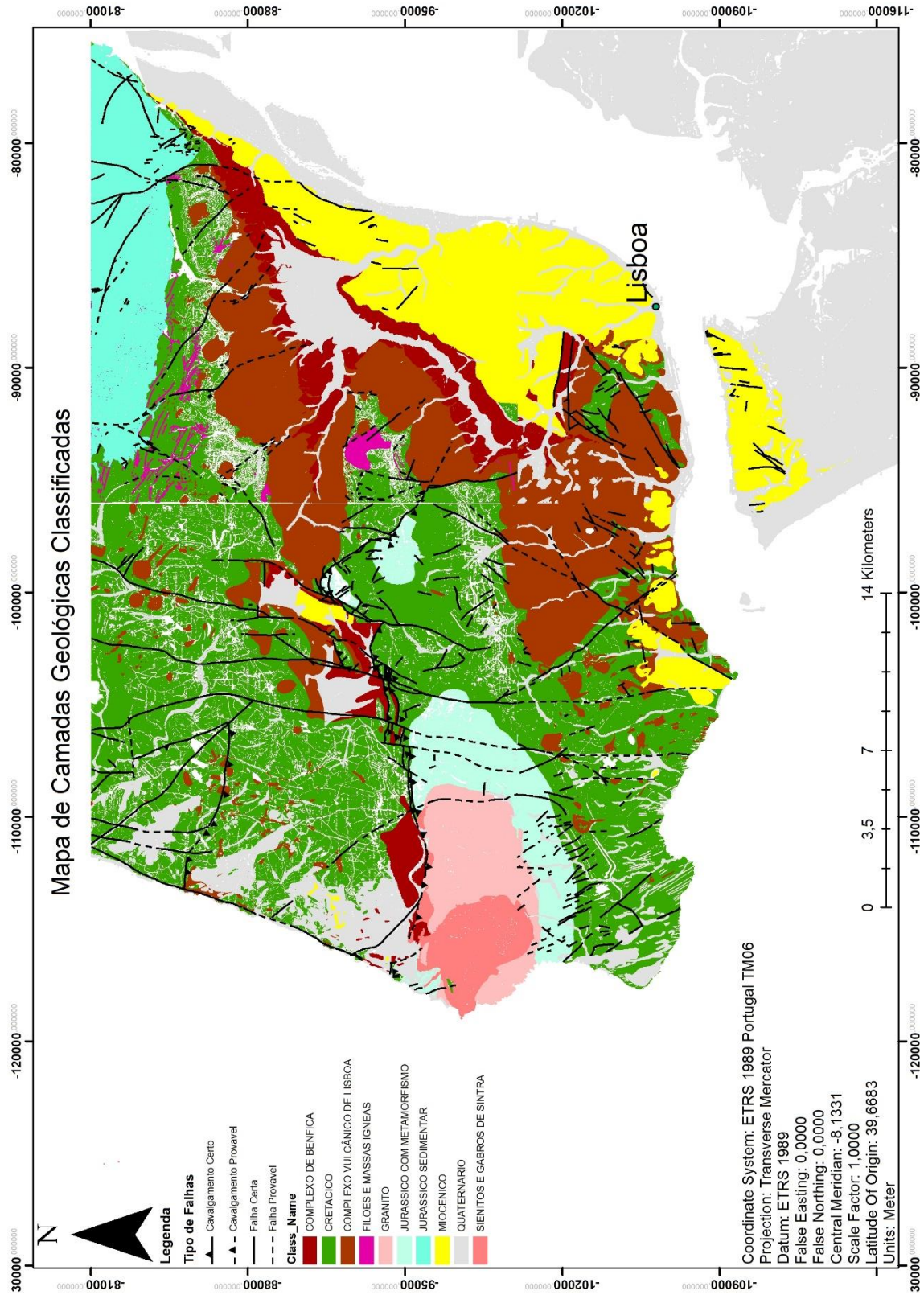


Figura 7.3 Mapa final classificado com recurso ao algoritmo de Maximum likelihood com destaque das formações geológicas, falhas geológicas e com a identificação da cidade de Lisboa (expandido)

#### 7.4 Anexo 4 – Amostra 3D.cga

```
/**
 * File: Amostras3D.cga
 * Created: 14 Nov 2018 10:23:29 GMT
 * Author: japgj
 */

version "2018.1"
attr F9_MODELOS=""

Ponto --> i("/Geologia/assets/Modelos/"+str(F9_MODELOS))

    s('10000,'10000,'10000)
    t(0, 500, 0)
```

#### 7.5 Anexo 5 – colunas.cga

```
/**
 * File: colunas.cga
 * Created: 22 Feb 2019 17:24:25 GMT
 * Author: japgj
 */

version "2018.1"

colunas -->

    extrude(1300)
    color(0,0,0)
```

#### 7.6 Anexo 6 – gerar\_modelo.cga

```
/**
 * File: gerar_modelo.cga
 * Created: 19 Nov 2018 10:21:26 GMT
 * Author: japgil
 */

version "2018.1"

A-->B.
```

## 7.7 Anexo 7 – transparencia.cga

```

/**
 * File: transparencia.cga
 * Created: 19 Nov 2018 10:27:19 GMT
 * Author: japgil
 */

version "2018.1"

modelo -->
t(0,50,0)
set(material.opacity, 0.001)
projectUV(4)

```

## 7.8 Anexo 8 – water.cga

```

/**
 * File: Water.cga
 * Created: 19 May 2014 18:33:19 GMT
 * Author: chri7180
 */

version "2018.1"

@Range(-180, 180)
attr Rotation = 0
@Range(0.1, 20.1)
attr Scale = 5
@File
attr Texture = "/Geologia/rules/SeaWater.jpg"
attr SizeX = 100
attr SizeZ = 100

Water -->

    alignScopeToAxes(y)
    rotateScope(0,Rotation,0)
    setupProjection(0, scope.xz, SizeX * Scale, SizeZ * Scale)
    projectUV(0)
    texture(Texture)
    # This line makes it animate in a web scene.
    set(material.name, "watermaterial__waterparams_50_50")

```

7.9 Anexo 9 – Folha 34-A da Carta Geológica de Portugal



Figura 7.4 Folha 34-A da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000

7.10 Anexo 10 – Folha 34-B da Carta Geológica de Portugal

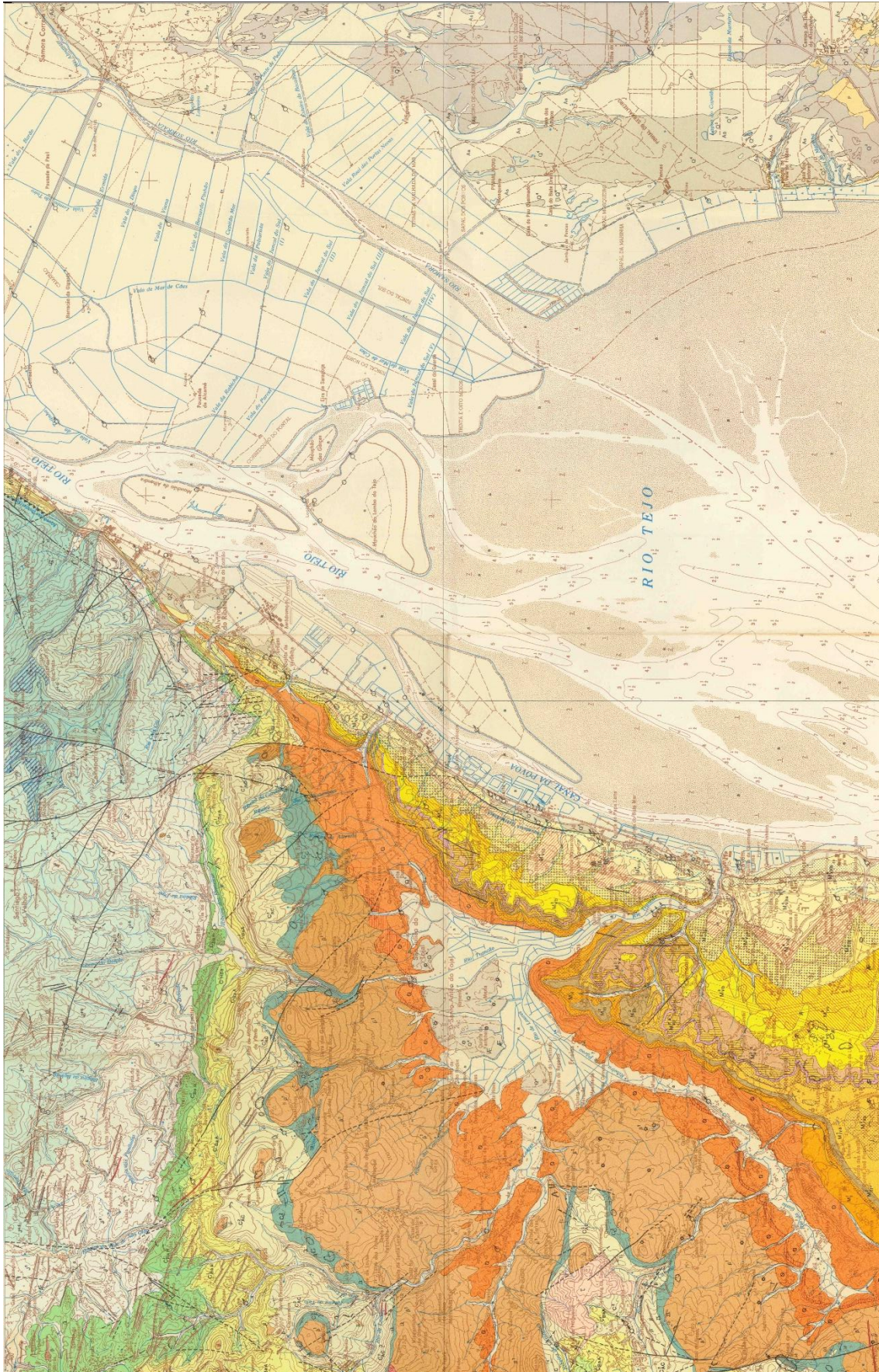


Figura 7.5 Folha 34B da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000

7.11 Anexo 11 – Folha 34-C da Carta Geológica de Portugal



Figura 7.6 Folha 34C da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000

7.12 Anexo 12 – Folha 34-D da Carta Geológica de Portugal

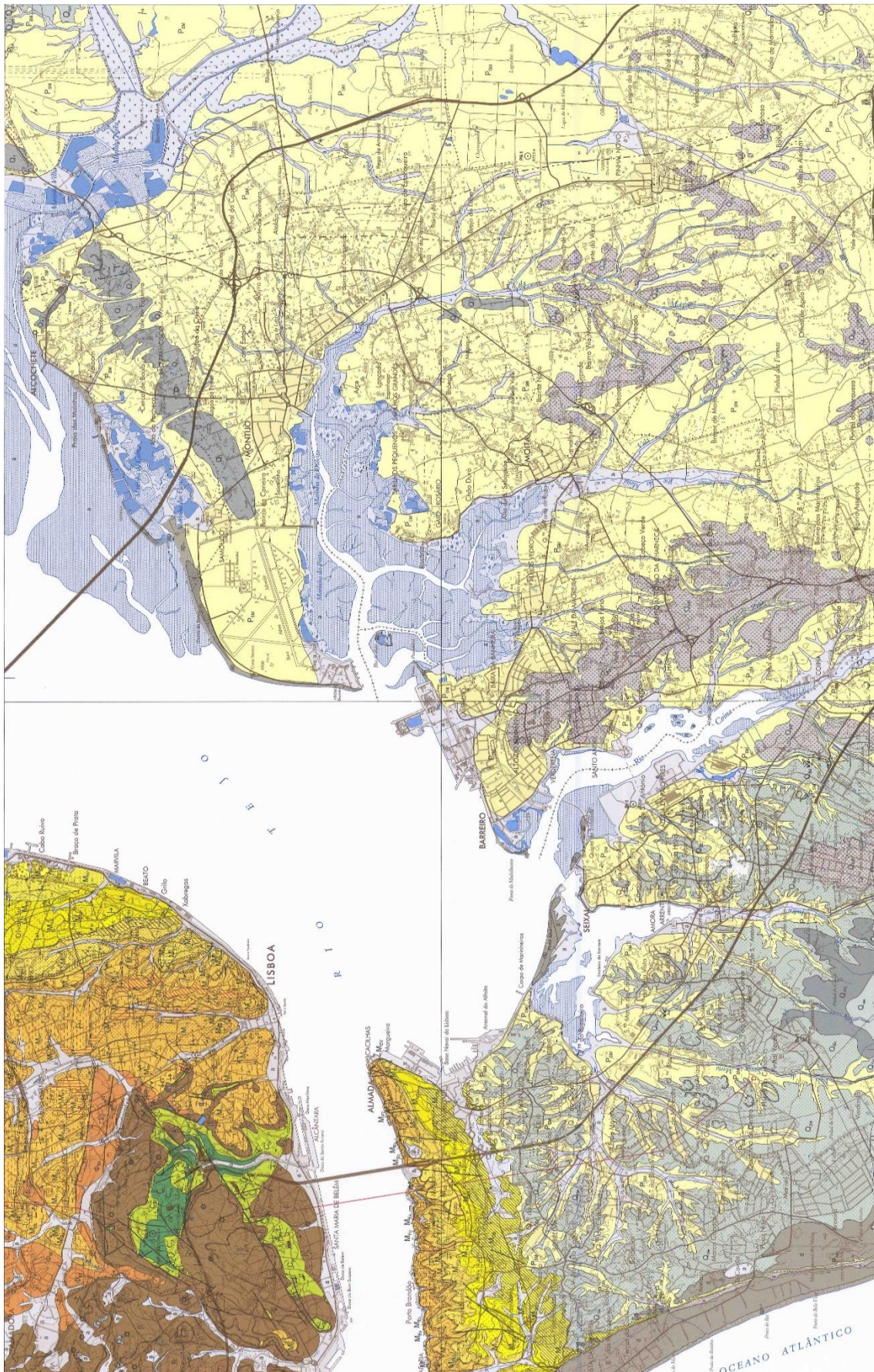


Figura 7.7 Folha 34D da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000

7.13 Anexo 13 – Matriz de confusão da folha 34-A

Confusion Matrix: G:\Tese\Classificacao auto\CartaA\Classificacao\MaxA\_limpo

Overall Accuracy = (1114709/1153097) 96.6709%  
 Kappa Coefficient = 0.9275

Class	Ground Truth (Pixels)				
	Teste AGUA	Teste COMPLEX	Teste COMPLEX	Teste CRETAC	Teste FILOES
Unclassified	0	0	0	0	0
Treino AGUA	835306	0	0	0	0
Treino COMPLE	0	31078	0	0	0
Treino COMPLE	0	221	34024	95	160
Treino CRETAC	0	0	0	55543	13
Treino FILOES	0	0	331	3955	2301
Treino GRANIT	0	0	0	0	0
Treino JURASS	186	0	0	0	0
Treino MIOCEN	0	0	0	0	0
Treino QUATER	197	0	316	252	0
Treino SIENIT	4109	178	270	0	5037
Total	839798	31477	34941	59845	7511

Class	Ground Truth (Pixels)				
	Teste GRANIT	Teste JURASS	Teste MIOCEN	Teste QUATER	Teste SIENIT
Unclassified	0	0	0	0	0
Treino AGUA	0	5462	0	0	0
Treino COMPLE	0	0	0	0	0
Treino COMPLE	0	0	0	0	0
Treino CRETAC	0	640	112	1040	382
Treino FILOES	454	0	0	0	266
Treino GRANIT	51165	0	0	0	1160
Treino JURASS	145	32261	0	3071	984
Treino MIOCEN	0	0	13431	0	0
Treino QUATER	0	4775	0	36070	328
Treino SIENIT	1658	2382	0	209	23530
Total	53422	45520	13543	40390	26650

Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
Treino AGUA	0.65	0.53	5462/840768	4492/839798
Treino COMPLE	0.00	1.27	0/31078	399/31477
Treino COMPLE	1.38	2.62	476/34500	917/34941
Treino CRETAC	3.79	7.19	2187/57730	4302/59845
Treino FILOES	68.51	69.36	5006/7307	5210/7511
Treino GRANIT	2.22	4.22	1160/52325	2257/53422
Treino JURASS	11.97	29.13	4386/36647	13259/45520
Treino MIOCEN	0.00	0.83	0/13431	112/13543
Treino QUATER	13.99	10.70	5868/41938	4320/40390
Treino SIENIT	37.04	11.71	13843/37373	3120/26650

Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
Treino AGUA	99.47	99.35	835306/839798	835306/840768
Treino COMPLE	98.73	100.00	31078/31477	31078/31078
Treino COMPLE	97.38	98.62	34024/34941	34024/34500
Treino CRETAC	92.81	96.21	55543/59845	55543/57730
Treino FILOES	30.64	31.49	2301/7511	2301/7307
Treino GRANIT	95.78	97.78	51165/53422	51165/52325
Treino JURASS	70.87	88.03	32261/45520	32261/36647
Treino MIOCEN	99.17	100.00	13431/13543	13431/13431
Treino QUATER	89.30	86.01	36070/40390	36070/41938
Treino SIENIT	88.29	62.96	23530/26650	23530/37373

Figura 7.8 Matriz de Confusão da Classificação da Folha 34-A

7.14 Anexo 14 – Matriz de confusão da folha 34-B parte A

Confusion Matrix: G:\Tese\Classificação auto\CartaB\Tentativa2\Class\_baixo\_baixo\Baixo\_baixo\_agre

Overall Accuracy = (77610/78945) 98.3089%  
 Kappa Coefficient = 0.9678

Class	Ground Truth (Pixels)			Total
	COMPLEXO DE B	MIOCENICO	QUATERNARIO	
Unclassified	0	0	0	0
COMPLEXO DE B	6772	711	0	7483
MIOCENICO	0	48012	545	48557
QUATERNARIO	0	79	22826	22905
Total	6772	48802	23371	78945

Class	Ground Truth (Percent)			Total
	COMPLEXO DE B	MIOCENICO	QUATERNARIO	
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00
COMPLEXO DE B	100.00	1.46	0.00	9.48
MIOCENICO	0.00	98.38	2.33	61.51
QUATERNARIO	0.00	0.16	97.67	29.01
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Commission	Omission	Commission	Omission
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
COMPLEXO DE B	9.50	0.00	711/7483	0/6772
MIOCENICO	1.12	1.62	545/48557	790/48802
QUATERNARIO	0.34	2.33	79/22905	545/23371

Class	Prod. Acc.	User Acc.	Prod. Acc.	User Acc.
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
COMPLEXO DE B	100.00	90.50	6772/6772	6772/7483
MIOCENICO	98.38	98.88	48012/48802	48012/48557
QUATERNARIO	97.67	99.66	22826/23371	22826/22905

Figura 7.9 Matriz de Confusão da Classificação da Folha 34-B - parte A

### 7.15 Anexo 15 – Matriz de confusão da folha 34-B parte B

Confusion Matrix: G:\Tese\Classificação auto\CartaB\Tentativa2\Class\_baixo\Baixo\_agregate

Overall Accuracy = (324953/374636) 86.7383%

Kappa Coefficient = 0.7878

Class	Ground Truth (Pixels)				
	AGUACOMPLEXO DE B	CVL	MIOCENICO	QUATERNARIO	Unclassified
Unclassified	0	0	0	0	0
AGUA	195764	0	0	0	17094
COMPLEXO DE B	0	24819	35	12	0
CVL	35	10269	39947	119	579
MIOCENICO	2998	43	886	30500	479
QUATERNARIO	17012	32	90	0	33923
Total	215809	35163	40958	30631	52075

Class	Total
Unclassified	0
AGUA	212858
COMPLEXO DE B	24866
CVL	50949
MIOCENICO	34906
QUATERNARIO	51057
Total	374636

Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
AGUA	8.03	9.29	17094/212858	20045/215809
COMPLEXO DE B	0.19	29.42	47/24866	10344/35163
CVL	21.59	2.47	11002/50949	1011/40958
MIOCENICO	12.62	0.43	4406/34906	131/30631
QUATERNARIO	33.56	34.86	17134/51057	18152/52075

Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
AGUA	90.71	91.97	195764/215809	195764/212858
COMPLEXO DE B	70.58	99.81	24819/35163	24819/24866
CVL	97.53	78.41	39947/40958	39947/50949
MIOCENICO	99.57	87.38	30500/30631	30500/34906
QUATERNARIO	65.14	66.44	33923/52075	33923/51057

Figura 7.10 Matriz de Confusão da Classificação da Folha 34-B- Parte B

7.16 Anexo 16 - Matriz de confusão da folha 34-B parte C

Confusion Matrix: F:\Tese\Classificação auto\CartaB\Tentativa2\Class\_cima\Cima\_agregation7

Overall Accuracy = (177494/217883) 81.4630%  
 Kappa Coefficient = 0.7425

Class	Ground Truth (Pixels)				
	AGUA2	BENFICA2	CVL2	CRETACICO2	JURASSICO2
Unclassified	0	0	0	0	0
AGUAL	10543	0	0	0	11763
COMPLEXO DE B	0	6996	438	0	0
CVL1	0	0	32096	205	0
CRETACICO1	0	0	0	51822	813
JURASSICO SED	10	0	0	10177	74876
FILOES E MASS	31	246	176	5861	10486
Total	10584	7242	32710	68065	97938

Class	Ground Truth (Pixels)	
	FILOES E MASS	Total
Unclassified	0	0
AGUAL	0	22306
COMPLEXO DE B	0	7434
CVL1	0	32301
CRETACICO1	0	52635
JURASSICO SED	183	85246
FILOES E MASS	1161	17961
Total	1344	217883

Class	Commission		Omission	
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
AGUAL	52.73	0.39	11763/22306	41/10584
COMPLEXO DE B	5.89	3.40	438/7434	246/7242
CVL1	0.63	1.88	205/32301	614/32710
CRETACICO1	1.54	23.86	813/52635	16243/68065
JURASSICO SED	12.16	23.55	10370/85246	23062/97938
FILOES E MASS	93.54	13.62	16800/17961	183/1344

Class	Prod. Acc.		User Acc.	
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
AGUAL	99.61	47.27	10543/10584	10543/22306
COMPLEXO DE B	96.60	94.11	6996/7242	6996/7434
CVL1	98.12	99.37	32096/32710	32096/32301
CRETACICO1	76.14	98.46	51822/68065	51822/52635
JURASSICO SED	76.45	87.84	74876/97938	74876/85246
FILOES E MASS	86.38	6.46	1161/1344	1161/17961

Figura 7.11 Matriz de Confusão da Classificação da Folha 34-B - parte C

7.17 Anexo 17 - Matriz de confusão da folha 34-B parte D

Confusion Matrix: G:\Tese\Classificação auto\CartaB\Tentativa2\Class\_esq\Esq\_agregated

Overall Accuracy = (55200/67993) 81.1848%

Kappa Coefficient = 0.7547

Class	Ground Truth (Pixels)				
	COMPLEXO DE B	CRETACICO	FILOES E MASS	QUATERNARIO	COMPLEXO VULC
Unclassified	0	0	0	0	0
COMPLEXO DE B	3703	0	0	0	0
CRETACICO	189	16260	83	678	367
FILOES E MASS	110	425	10503	1595	0
QUATERNARIO	0	7383	0	8798	32
CVL	6	1754	0	171	15936
Total	4008	25822	10586	11242	16335

Class	Total
Unclassified	0
COMPLEXO DE B	3703
CRETACICO	17577
FILOES E MASS	12633
QUATERNARIO	16213
CVL	17867
Total	67993

Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
COMPLEXO DE B	0.00	7.61	0/3703	305/4008
CRETACICO	7.49	37.03	1317/17577	9562/25822
FILOES E MASS	16.86	0.78	2130/12633	83/10586
QUATERNARIO	45.73	21.74	7415/16213	2444/11242
CVL	10.81	2.44	1931/17867	399/16335

Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
COMPLEXO DE B	92.39	100.00	3703/4008	3703/3703
CRETACICO	62.97	92.51	16260/25822	16260/17577
FILOES E MASS	99.22	83.14	10503/10586	10503/12633
QUATERNARIO	78.26	54.27	8798/11242	8798/16213
CVL	97.56	89.19	15936/16335	15936/17867

Figura 7.12 Matriz de Confusão da Classificação da Folha 34-B - parte D

7.18 Anexo 18 – Matriz de confusão da folha 34 – B parte E

Confusion Matrix: F:\Tese\Classificacao auto\CartaB\Tentativa2\Class\_dir\dir\_agregated

Overall Accuracy = (49269/51417) 95.8224%

Kappa Coefficient = 0.9316

Class	Ground Truth (Pixels)				Total
	AGUA2	BENFICA2	MIOCENICO2	QUATERNARIO2	
Unclassified	0	0	0	0	0
AGUA1	15027	0	0	221	15248
COMPLEXO DE B	0	3086	60	191	3337
MIOCENICO1	73	0	4756	1051	5880
QUATERNARIO1	552	0	0	26400	26952
Total	15652	3086	4816	27863	51417

Class	Ground Truth (Percent)				Total
	AGUA2	BENFICA2	MIOCENICO2	QUATERNARIO2	
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
AGUA1	96.01	0.00	0.00	0.79	29.66
COMPLEXO DE B	0.00	100.00	1.25	0.69	6.49
MIOCENICO1	0.47	0.00	98.75	3.77	11.44
QUATERNARIO1	3.53	0.00	0.00	94.75	52.42
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Commission	Omission	Commission	Omission
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
AGUA1	1.45	3.99	221/15248	625/15652
COMPLEXO DE B	7.52	0.00	251/3337	0/3086
MIOCENICO1	19.12	1.25	1124/5880	60/4816
QUATERNARIO1	2.05	5.25	552/26952	1463/27863

Class	Prod. Acc.	User Acc.	Prod. Acc.	User Acc.
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
AGUA1	96.01	98.55	15027/15652	15027/15248
COMPLEXO DE B	100.00	92.48	3086/3086	3086/3337
MIOCENICO1	98.75	80.88	4756/4816	4756/5880
QUATERNARIO1	94.75	97.95	26400/27863	26400/26952

Figura 7.13 Matriz de Confusão da Classificação da Folha 34-B - parte E

7.19 Anexo 19 – Matriz de confusão da folha 34-C

Confusion Matrix: G:\Tese\Classificacao auto\CartaC\Treino-3\Max2

Overall Accuracy = (827221/851515) 97.1470%  
 Kappa Coefficient = 0.9150

Class	Ground Truth (Pixels)				
	Teste2 Agua	Teste2 Cretac	Teste2 CVL	Teste2 Linhas	Teste2 Filoe
Unclassified	0	0	0	0	0
Treino2 Agua	683329	0	0	0	0
Treino2 Creta	26	41358	2	9	0
Treino2 CVL	0	150	35434	2	26
Treino2 Linha	0	1443	362	441	21
Treino2 Filoe	0	0	333	0	3705
Treino2 Grani	0	0	211	0	384
Treino2 Juras	15196	249	17	6	0
Treino2 Mioce	0	12	25	0	0
Treino2 Quate	0	22	23	27	0
Treino2 Sieni	0	17	108	70	71
Total	698551	43251	36515	555	4207

Class	Ground Truth (Pixels)				
	Teste2 Granit	Teste2 Jurass	Teste2 Miocen	Teste2 Quater	Teste2 Sienit
Unclassified	0	0	0	0	0
Treino2 Agua	0	0	0	0	0
Treino2 Creta	0	204	124	0	0
Treino2 CVL	15	72	142	9	129
Treino2 Linha	17	329	42	233	1053
Treino2 Filoe	634	0	0	0	333
Treino2 Grani	11184	0	0	0	0
Treino2 Juras	0	15144	0	898	11
Treino2 Mioce	0	0	12983	0	0
Treino2 Quate	0	257	0	15016	235
Treino2 Sieni	108	71	0	566	8627
Total	11958	16077	13291	16722	10388

	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
Treino2 Agua	0.00	2.18	0/683329	15222/698551
Treino2 Creta	0.87	4.38	365/41723	1893/43251
Treino2 CVL	1.51	2.96	545/35979	1081/36515
Treino2 Linha	88.81	20.54	3500/3941	114/555
Treino2 Filoe	25.97	11.93	1300/5005	502/4207
Treino2 Grani	5.05	6.47	595/11779	774/11958
Treino2 Juras	51.96	5.80	16377/31521	933/16077
Treino2 Mioce	0.28	2.32	37/13020	308/13291
Treino2 Quate	3.62	10.20	564/15580	1706/16722
Treino2 Sieni	10.49	16.95	1011/9638	1761/10388

Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
Treino2 Agua	97.82	100.00	683329/698551	683329/683329
Treino2 Creta	95.62	99.13	41358/43251	41358/41723
Treino2 CVL	97.04	98.49	35434/36515	35434/35979
Treino2 Linha	79.46	11.19	441/555	441/3941
Treino2 Filoe	88.07	74.03	3705/4207	3705/5005
Treino2 Grani	93.53	94.95	11184/11958	11184/11779
Treino2 Juras	94.20	48.04	15144/16077	15144/31521
Treino2 Mioce	97.68	99.72	12983/13291	12983/13020
Treino2 Quate	89.80	96.38	15016/16722	15016/15580
Treino2 Sieni	83.05	89.51	8627/10388	8627/9638

Figura 7.14 Matriz de Confusão da Classificação da Folha 34-C

7.20 Anexo 20 – Matriz de confusão da folha 34-D

Confusion Matrix: G:\Tese\Classificacao auto\CartaD\Classificacao\MaxD\_limpa

Overall Accuracy = (379906/398105) 95.4286%  
 Kappa Coefficient = 0.9266

Class	Ground Truth (Pixels)				
	Teste AGUA	Teste COMPLE	Teste COMPLE	Teste CRETAC	Teste MIOCENI
Unclassified	0	0	0	0	0
Treino AGUA	213893	0	0	0	0
Treino COMPLE	0	9076	0	0	181
Treino COMPLE	0	946	26677	0	964
Treino CRETAC	0	0	0	12680	1719
Treino MIOCEN	0	84	193	106	27443
Treino QUATER	0	0	0	0	57
Total	213893	10106	26870	12786	30364

Class	Ground Truth (Pixels)	
	Teste QUATERN	Total
Unclassified	0	0
Treino AGUA	12528	226421
Treino COMPLE	0	9257
Treino COMPLE	173	28760
Treino CRETAC	371	14770
Treino MIOCEN	877	28703
Treino QUATER	90137	90194
Total	104086	398105

Class	Commission	Omission	Commission	Omission
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
Treino AGUA	5.53	0.00	12528/226421	0/213893
Treino COMPLE	1.96	10.19	181/9257	1030/10106
Treino COMPLE	7.24	0.72	2083/28760	193/26870
Treino CRETAC	14.15	0.83	2090/14770	106/12786
Treino MIOCEN	4.39	9.62	1260/28703	2921/30364
Treino QUATER	0.06	13.40	57/90194	13949/104086

Class	Prod. Acc.	User Acc.	Prod. Acc.	User Acc.
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
Treino AGUA	100.00	94.47	213893/213893	213893/226421
Treino COMPLE	89.81	98.04	9076/10106	9076/9257
Treino COMPLE	99.28	92.76	26677/26870	26677/28760
Treino CRETAC	99.17	85.85	12680/12786	12680/14770
Treino MIOCEN	90.38	95.61	27443/30364	27443/28703
Treino QUATER	86.60	99.94	90137/104086	90137/90194

Figura 7.15 Matriz de Confusão da Classificação da Folha 34-D