

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



**COBERTURA AÉREA NACIONAL RAF47 –
RECUPERAÇÃO RADIOMÉTRICA E
TRIANGULAÇÃO**

Dora Luísa Ferreira da Luz Roque

MESTRADO EM ENGENHARIA GEOGRÁFICA

2009

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



**COBERTURA AÉREA NACIONAL RAF47 –
RECUPERAÇÃO RADIOMÉTRICA E
TRIANGULAÇÃO**

Dora Luísa Ferreira da Luz Roque

Orientadora: Prof.^a Doutora Paula Redweik

MESTRADO EM ENGENHARIA GEOGRÁFICA

2009

Resumo

Um conjunto de fotografias aéreas foi oferecido aos Serviços Cartográficos do Exército, em 1948, pela *British Royal Air Force*. Os recipientes metálicos, onde se encontram guardados os rolos de filme fotográfico, têm seguido a instituição em todas as suas mudanças de instalações. Actualmente, esta cobertura aérea pode ser encontrada numa sala própria, com um sistema de refrigeração, nas instalações do Instituto Geográfico do Exército.

A fim de obter alguma informação sobre o voo, foi realizada uma pesquisa. Foram encontrados vários dados relativos ao avião, à câmara e às lentes, incluindo um valor para a constante da câmara.

Uma metodologia para recuperar as propriedades radiométricas e geométricas das imagens foi aplicada sobre um pequeno conjunto de fotografias.

Devido à idade, à qualidade das lentes e às “aventuras” a que as fotografias do RAF47 têm sido sujeitas, a qualidade radiométrica das imagens está longe de ser a indicada para a realização de uma triangulação automática. Para ultrapassar este problema, foi desenvolvido um programa para possibilitar a uniformização da luminosidade das fotografias.

Quanto à recuperação geométrica, foi encontrado um problema muito grave: a inexistência de certificado de calibração da câmara. Várias experiências foram realizadas para encontrar a forma correcta de realizar a orientação interna das imagens e foi construído um programa para detectar automaticamente as marcas fiduciais.

As coordenadas foto dos pontos de passagem e dos pontos de ligação foram obtidas através de uma triangulação automática.

Como a área geográfica estudada neste projecto testemunhou muitas alterações ao nível do uso do solo nos últimos 62 anos, os pontos fotogramétricos não foram adquiridos através de um levantamento topográfico. Como alternativa, foram utilizados pontos fotogramétricos documentados em antigos cadernos de campo.

Os parâmetros de orientação externa foram calculados através de uma triangulação em bloco por feixes perspectivos, onde também foram determinados os parâmetros de auto-calibração. Estes permitiram a construção de um modelo de distorção das lentes usadas.

Foi realizado um controlo de qualidade dos resultados obtidos. Os pontos fotogramétricos que não foram usados na triangulação foram medidos nos modelos estereoscópicos formados a partir das fotos orientadas. Os valores foram utilizados para estudar o comportamento da incerteza e do deslocamento dos pontos ao longo da cobertura.

Os dados adquiridos durante a pesquisa e a recuperação geométrica foram reunidos numa base de dados foto-geográfica, onde poderão ser facilmente encontrados pelos interessados nas fotografias do voo RAF47.

Palavras-chave: fotografias aéreas antigas, recuperação radiométrica, orientação interna, triangulação por feixes perspectivos, base de dados foto-geográfica.

Abstract

A set of aerial photographs was given to the Serviços Cartográficos do Exército in 1948 by the British Royal Air Force. The metal bins where the photographic film is stored have followed the institute in all its facilities changes. In the present days this set can be found in a special refrigerated room in the facilities of the Instituto Geográfico do Exército.

A research was made in order to get some information about the flight. Many interesting data related to the plane, camera and lenses have been found, including a value for the camera focal length.

A methodology to recover the radiometric and the geometric properties of the images was applied in a small set of photographs.

Due to age, poor quality lenses and the many “adventures” that the photographs of RAF47 have gone through, the radiometric quality of the images is far from being suitable for an automatic triangulation. To overcome this problem, a program has been developed, so that it becomes possible to turn the photographs background luminosity uniform.

As for the geometric recovery of the photos, a huge problem had to be solved: the inexistence of the camera calibration certificate. A lot of tests were made in order to find the correct way to perform the interior orientation and a program was built to automatically find the fiducial marks of the photographs.

The photo coordinates of the pass points and of the tie points were achieved through an automatic triangulation.

As the geographic area studied in this project witnessed a lot of land use changes in the last 62 years, the ground control points were not obtained by a topographic survey. Instead, the coordinates of ground control points from old field notes were used.

The exterior orientation parameters were calculated in a bundle block adjustment where the additional parameters for self-calibration were also determined, allowing a lens distortion model to be built.

A quality control to check the results obtained in the last step was made. Some of the ground control points which were not used in the bundle block adjustment were measured in the stereoscopic models built through the oriented photographs. These values were used to study the behavior of uncertainty and point displacements throughout the photographic block.

All the data achieved in the research and during the geometric recovery were joined in a photo-geographic database where they will be able to be easily found by all the people interested in using the photographs from the RAF47 flight.

Keywords: old aerial photos, radiometric recovery, interior orientation, bundle block adjustment, photo-geographic database.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos aqueles que de uma forma directa ou indirecta contribuíram para este trabalho.

À minha orientadora, a Sra. Professora Doutora Paula Redweik, pelo entusiasmo em relação a este trabalho, que me ajudou a encontrar motivação mesmo nas fases mais complicadas do projecto, pelo apoio científico e esclarecimentos prestados.

Ao Sr. Major Nuno Jordão, por todos os esforços efectuados para que fossem reunidas as condições necessárias para a realização do trabalho e por todas as chamadas de atenção para detalhes extremamente importantes, nos quais eu nunca teria reparado.

Ao Sr. Sargento-ajudante José Dias, cujo apoio foi fundamental na realização da aerotriangulação, pelas explicações e conselhos dados e pela ajuda na medição de alguns pontos fotogramétricos mais problemáticos.

Ao Sr. Sargento-ajudante José Guerreiro, que me forneceu todos os dados relativos ao RAF47 existentes no arquivo do Instituto Geográfico do Exército e me indicou onde poderia obter mais informações sobre o voo.

Ao colega António Marques, com quem tive a oportunidade de discutir muitos dos aspectos relativos ao trabalho e que me ajudou a resolver diversos problemas, principalmente relativos à informática.

Ao Instituto Geográfico do Exército, não só pelo facto de me ter sido dada a oportunidade de realizar este trabalho nas suas instalações e de me terem sido dadas todas as condições para a realização deste, mas também pelo excelente trabalho realizado na preservação do património aerofotográfico antigo.

Aos meus pais e à minha irmã, por todo o apoio que me têm dado desde que nasci.

Índice

1. Capítulo I – Introdução	1
1.1. Enquadramento do Trabalho	1
1.2. Objectivos	2
1.3. Organização do Trabalho.....	4
2. Capítulo II – Material Fotogramétrico Utilizado no Voo RAF47	5
2.1. Breve História da Fotografia Aérea.....	5
2.2. O Avião Mosquito PR Mk 34.....	7
2.3. A Câmara Fotográfica K-17	10
2.4. As Lentes Metrogon	13
3. Capítulo III – O Percurso do Voo RAF47 no Instituto Geográfico do Exército.....	17
3.1. Aquisição do Voo	17
3.2. Arquivo e Conservação das Imagens.....	20
3.3. Digitalização das Imagens	21
3.4. Selecção e Análise das Fotografias Aéreas da Zona de Estudo	22
4. Capítulo IV – Recuperação Radiométrica.....	26
4.1. Razões para a Realização da Recuperação Radiométrica	26
4.2. Primeira Opção de Processamento – Luminosidade Heterogénea	27
4.2.1. Identificação do Primeiro Problema Radiométrico	27
4.2.2. Operações Realizadas sobre os Histogramas	28
4.2.3. Transformação dos Histogramas das Imagens do Voo RAF47	29
4.3. Segunda Opção de Processamento – Luminosidade Variável.....	33
4.3.1. Identificação do Segundo Problema Radiométrico	33
4.3.2. Abertura Morfológica de Imagens de Cinzentos.....	35
4.3.3. Luminosidade de Imagens Auxiliares	38
4.3.4. Optimização do Algoritmo da Abertura Morfológica.....	40
4.4. Terceira Opção de Processamento – Grandes Descontinuidades	46
4.4.1. Identificação do Terceiro Problema Radiométrico	46
4.4.2. Filtro Média.....	47
4.4.3. Aplicação do Filtro Média Às Imagens do Voo RAF47	49
4.5. Comparação dos Algoritmos de Tratamento de Imagem	51
5. Capítulo V – Recuperação Geométrica.....	54
5.1. Orientação Interna	54
5.1.1. Orientação Interna das Fotografias do Voo RAF47.....	56
5.1.2. Marcas Fiduciais e Sistema de Coordenadas Foto	56

5.1.3.	Parâmetros de Transformação Afim	59
5.1.4.	Determinação da Orientação Interna das Fotografias Aéreas sem Certificado de Calibração.....	63
5.1.5.	Detecção Automática das Marcas Fiduciais.....	68
5.1.5.1.	Algoritmo.....	68
5.1.5.1.1.	Limiarização	69
5.1.5.1.2.	Reconstrução das Marcas Fiduciais	73
5.1.5.1.3.	Identificação de Um Ponto Pertencente À Marca.....	78
5.1.5.1.4.	Controlo de Qualidade dos Pontos Encontrados.....	80
5.1.5.2.	Análise dos Resultados Obtidos na Detecção Automática das Marcas Fiduciais	81
5.2.	Triangulação Automática	84
5.3.	Pontos Fotogramétricos	89
5.4.	Triangulação Aérea.....	97
5.4.1.	Aquisição dos Dados de Entrada para a Triangulação Aérea	98
5.4.2.	Realização da Triangulação Aérea	102
5.4.2.1.	Triangulação Aérea por Feixes Perspectivos.....	102
5.4.2.2.	Auto-Calibração.....	104
5.4.3.	Análise dos Resultados.....	106
5.5.	Controlo de Qualidade da Aerotriangulação	108
5.6.	Base de Dados Foto-geográfica com os Resultados da Aerotriangulação	112
6.	Capítulo VI – Conclusões	114
7.	Referências	116

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Modelos de aviões pertencentes ao esquadrão N.º 58 [Barrass, 2007].	9
Tabela 2.2 – Distorções das lentes Metrogon [American Society of Photogrammetry, 1952].	15
Tabela 2.3 – Distorção Radial Máxima de lentes de várias marcas [American Society of Photogrammetry, 1980].	16
Tabela 3.1 – Número de fotografias por fiada e número dos respectivos rolos.	24
Tabela 5.1 – Resultados das experiências realizadas com a Orientação Interna.	66
Tabela 5.2 – Datas dos cadernos dos vértices geodésicos, vértices auxiliares de sinalização permanente e pontos fotogramétricos, para cada folha.	95
Tabela 5.3 – Parâmetros de transformação entre sistemas de coordenadas dos pontos fotogramétricos e dos vértices geodésicos, para várias datas e respectivas incertezas.	96
Tabela 5.4 – Erros Médios Quadráticos dos pontos fotogramétricos e de verificação e resíduos dos pontos fotogramétricos, com auto-calibração.	107
Tabela 5.5 – Erros Médios Quadráticos dos pontos fotogramétricos e de verificação e resíduos dos pontos fotogramétricos, sem auto-calibração.	107
Tabela 5.6 – Precisão das coordenadas foto e número de pontos encontrado durante a triangulação automática para cada tipo de tratamento de imagens.	111

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Câmara num papagaio para obtenção de fotografias aéreas, retirada de Northstar Gallery (2005).	6
Figura 2.2 – Documento com a identificação do avião utilizado, adaptado de Redweik <i>et al.</i> (2009).	8
Figura 2.3 – Avião do modelo Mosquito pertencente à RAF, retirada de RAF (2009).	10
Figura 2.4 – Documento com a identificação da câmara utilizada, adaptado de Redweik <i>et al.</i> (2009).	11
Figura 2.5 – Câmara aérea K-17 com uma objectiva de 6”, retirada de Evidence in Camera (1945).	11
Figura 2.6 – Intervalómetro (esquerda) e regulador de sobreposição (direita), retiradas de American Society of Photogrammetry (1944).	13
Figura 3.1 – Enquadramento das fotografias do voo RAF47 referentes à região de Lisboa (IGeoE).	19
Figura 3.2 – Relação entre o centro de projecção, o negativo e o positivo, retirada de Schwidofsky (1943).	21
Figura 3.3 – Zona seleccionada para testar a metodologia de trabalho (IGeoE).	23
Figura 3.4 – Excerto de imagem onde falta um pedaço de película (IGeoE).	25
Figura 4.1 – Menu do programa desenvolvido que permite seleccionar um dos três tipos de tratamento de imagens disponíveis.	27
Figura 4.2 – Mosaico construído com imagens antes do processamento (IGeoE).	28
Figura 4.3 – Histogramas de imagens pertencentes a fiadas adjacentes, antes de serem tratadas.	30
Figura 4.4 – Mosaico construído com imagens processadas com a opção “Luminosidade Heterogénea” (IGeoE).	32
Figura 4.5 - Histogramas de imagens pertencentes a fiadas adjacentes, depois de serem tratadas com a opção “Luminosidade Heterogénea”	32
Figura 4.6 – Fotografia aérea afectada pelo reflexo do Sol na água e por faixas verticais (IGeoE).	34
Figura 4.7 – Fotografia aérea com os cantos escurecidos (IGeoE).	34
Figura 4.8 – Fracção de imagem de luminosidade com diferentes valores de cinzento para cada imagem auxiliar.	39
Figura 4.9 – Imagem teste onde são visíveis as discontinuidades entre as imagens auxiliares.	41
Figura 4.10 – Efeito da utilização do filtro média sobre imagens auxiliares e sua posterior união numa imagem única.	43
Figura 4.11 – Comparação de pormenores de uma imagem antes (esquerda) e depois (direita) de processada com o segundo algoritmo (IGeoE).	44
Figura 4.12 – Comparação de superfícies de luminosidade antes (esquerda) e depois (direita) do processamento da imagem com o segundo algoritmo.	45

Figura 4.13 – Histogramas de duas imagens consecutivas (esquerda e direita) antes (em cima) e depois (em baixo) de processadas com o segundo algoritmo.....	46
Figura 4.14 – Imagem com uma grande descontinuidade radiométrica, antes do processamento (IGeoE).	47
Figura 4.15 – Imagem com grandes descontinuidades radiométricas depois da aplicação do filtro média.	49
Figura 4.16 – Imagem com grandes descontinuidades radiométricas depois do tratamento com o terceiro algoritmo.	50
Figura 4.17 – Comparação das superfícies de luminosidade de uma imagem depois de processada com o terceiro algoritmo.....	51
Figura 4.18 – Canto de uma imagem antes (esquerda) e depois (direita) de processada com a segunda e primeira opção de tratamento.	52
Figura 4.19 – Histograma da imagem tratada com o terceiro algoritmo.....	52
Figura 5.1 – Sistema de coordenadas foto, definido pelos eixos $x y z$. Adaptada de American Society of Photogrammetry (1980).	55
Figura 5.2 – Marcas fiduciais do voo RAF47 (IGeoE).	57
Figura 5.3 – Esquema das marcas fiduciais e dos sistemas de coordenadas foto em imagens obtidas em sentidos opostos: de Oeste para Este (esquerda) e de Este para Oeste (direita). ...	58
Figura 5.4 – Número representado sobre a imagem (IGeoE).	58
Figura 5.5 – Rotação entre os sistemas de coordenadas pixel ($X_P O Y_P$) e foto ($x O y$).	62
Figura 5.6 – Esquema dos sistemas de coordenadas pixel e foto, das marcas fiduciais e da respectiva ordem de medição, nos positivos.	67
Figura 5.7 – Histograma de um corte efectuado numa imagem processada, na zona da marca fiducial.....	71
Figura 5.8 – Histograma de um corte efectuado numa imagem original, na zona da marca fiducial.....	71
Figura 5.9 – Imagem resultante da limiarização e binarização de um corte contendo uma marca fiducial.	72
Figura 5.10 – Marcador da marca fiducial: resultado de uma erosão realizada até o número de Euler ser 1.....	74
Figura 5.11 – Corte em que o número de Euler é igual a 0, mas a imagem não está vazia.	75
Figura 5.12 – Marca fiducial reconstruída a partir de operações morfológicas.	76
Figura 5.13 – Corte original (esquerda) com problemas e a respectiva reconstrução da marca fiducial (direita).	77
Figura 5.14 – Método de pesquisa de pontos pertencentes à marca fiducial.	78
Figura 5.15 – Pontos detectados pelo algoritmo (vermelho) e vectores definidos por trios de pontos.	79
Figura 5.16 – Gráfico com os dados estatísticos do controlo de qualidade efectuado ao programa de detecção automática das marcas fiduciais.	82
Figura 5.17 – Imagem do nível superior de uma pirâmide.	86
Figura 5.18 – Distribuição dos pontos de passagem (rosa) e dos pontos de ligação (azuis) na área de trabalho.	88

Figura 5.19 – Conjunto de edifícios onde não são visíveis as estruturas normalmente identificadas pelo algoritmo de detecção de pontos homólogos (IGeoE).....	88
Figura 5.20 – Miniatura de uma das fotografias rejeitadas durante a triangulação automática (IGeoE).....	89
Figura 5.21 – Planeamento da distribuição dos PFs no bloco.....	90
Figura 5.22 – Alterações na ocupação do solo entre 1947 (esquerda) e 2009 (direita).	91
Figura 5.23 – Base de dados geográfica com a localização dos pontos fotogramétricos e respectiva legenda.	92
Figura 5.24 – Distribuição final dos PFs no bloco.	94
Figura 5.25 – Vértice geodésico Guia, o qual foi utilizado como ponto fotogramétrico (IGeoE).....	94
Figura 5.26 – Centro de fotografia localizado sobre água.	99
Figura 5.27 – Enquadramento de apoio à aerotriangulação, elaborado a partir das aproximações iniciais aos parâmetros de orientação externa.	101
Figura 5.28 – Distorções detectadas nas fotografias do RAF47 durante a auto-calibração, adaptada de Intergraph Corporation (2008).	105
Figura 5.29 – Modelo das distorções das lentes utilizadas na aquisição das fotografias, adquirida com o ISAT [®]	105
Figura 5.30 – Distribuição dos pontos de verificação no bloco (triângulos vermelhos).....	108
Figura 5.31 – Elipses de erro absolutas dos pontos de verificação.	109
Figura 5.32 – Superfície com as diferenças verificadas em altimetria, em metros, obtida com o Surfer [®]	110
Figura 5.33 – Exemplo de informação que pode ser consultada na base de dados foto- -geográfica.....	113 113
Figura 5.34 – Exemplo de pesquisa realizada sobre a base de dados geográfica, no ArcGIS [®]	113 113

Lista de Símbolos e/ou Abreviaturas

IGeoE – Instituto Geográfico do Exército

ISAT[®] – *ImageStation Automatic Triangulation*[®]

ISSD[®] - *ImageStation Stereo Display*[®]

GPS – *Global Positioning System*

PFs – Pontos Fotogramétricos

RAF – *Royal Air Force*

SCE – Serviços Cartográficos do Exército

TA – Triangulação Automática

VASP – Vértices Auxiliares de Sinalização Permanente

VGs – Vértices Geodésicos

1. Capítulo I – Introdução

1.1. Enquadramento do Trabalho

A ideia de utilizar fotografias na obtenção de produtos cartográficos surgiu pela primeira vez em França, no século XIX. Os instrumentos utilizados na aquisição das primeiras imagens eram, ainda, bastante rudimentares; no entanto, já permitiam a elaboração de produtos cartográficos com precisões próximas das obtidas em produtos baseados em levantamentos topográficos. Devido à dificuldade em encontrar um veículo aéreo que pudesse ser controlado de forma a permitir a aquisição de fotografias a partir de uma posição pré-definida, como era conveniente na obtenção de imagens destinadas a fins cartográficos, as primeiras plantas produzidas através de métodos fotogramétricos foram obtidas através de fotografias terrestres [American Society of Photogrammetry, 1952]. Com o desenvolvimento dos aviões, nos primeiros anos do século XX, passou a ser possível obter fotografias aéreas. Este avanço tecnológico revolucionou a produção cartográfica, pois permitiu a aquisição de fotografias que obedecessem às condições necessárias para serem construídos modelos estereoscópicos. Esta capacidade, aliada ao desenvolvimento de aparelhos destinados à aquisição de informação geométrica do terreno a partir dos referidos modelos – estereorrestituidores, tornou a elaboração de cartas muito mais cómoda, rápida e económica. Em Portugal, a produção cartográfica através de métodos fotogramétricos teve início na década de 30 do século XX [Redweik *et al*, 2009].

Contudo, as fotografias aéreas não eram utilizadas apenas para produção cartográfica. As aplicações militares eram outra das suas finalidades e foram as grandes responsáveis pelo desenvolvimento da fotogrametria durante o século XX. As duas Guerras Mundiais desempenharam um papel fundamental nesta tarefa, conduzindo ao aperfeiçoamento dos instrumentos utilizados. Apesar de a produção cartográfica também ser uma das finalidades que as instituições militares atribuíam às fotografias aéreas, durante períodos de confrontos bélicos, estas eram direccionadas para a realização de interpretação fotográfica. Esta técnica permitia estudar os movimentos das forças inimigas e facilitava o desenvolvimento de estratégias mais adequadas aos fins propostos. A interpretação fotográfica também tinha

grande importância em actividades civis. Actualmente, as fotografias aéreas continuam a ser aplicadas em muitas das áreas em que eram usadas na primeira metade do século XX.

Ao longo das últimas décadas, a fotogrametria foi alvo de um grande desenvolvimento, não só ao nível dos instrumentos utilizados, como as câmaras aéreas, que hoje em dia já adquirem imagens em formato digital, mas também na forma de aquisição da informação geométrica. Dos estereorrestituidores analógicos, passando por uma fase de aparelhos analíticos, actualmente a estereorrestituição é feita em estações fotogramétricas digitais, as quais têm princípios de funcionamento distintos dos antigos aparelhos analógicos.

Para além das finalidades cartográficas e militares, as fotografias aéreas têm bastante interesse para a realização de estudos em áreas como a geologia, a geografia, a arqueologia e a história [Redweik *et al*, 2009]. Uma vez que as fotografias aéreas correspondem a representações fiéis do terreno na época em que são obtidas, se estas forem conservadas nas condições adequadas, as imagens podem ser utilizadas para obter informação sobre o terreno, numa determinada zona e numa determinada época.

A importância das fotografias do voo RAF47, nos dias de hoje, está relacionada com este último aspecto. Este conjunto de imagens de Portugal foi obtido pela *British Royal Air Force* em 1947. Este é um dos voos mais antigos do nosso país e, também, um dos mais utilizados na realização de estudos que envolvam a evolução da paisagem ao longo dos últimos 62 anos.

As fotografias relativas a este voo encontram-se nas instalações do Instituto Geográfico do Exército, onde foi realizado o trabalho que deu origem a esta dissertação. Para além dos cilindros metálicos, cuidadosamente arquivados, onde se encontram os rolos fotográficos com as fotografias registadas, a única fonte de informação existente sobre o voo consiste num caderno antigo que contém esquemas das posições relativas das fotografias colocadas sobre uma carta antiga. No entanto, esta fonte de informação está longe de ser suficiente para a aquisição de dados rigorosos.

1.2.Objectivos

A fim de obter informação geométrica rigorosa a partir de uma cobertura aérea, para que esta possa ser utilizada em trabalhos científicos, é fundamental conhecer diversos dados relacionados com a aquisição das imagens, nomeadamente, os dados relativos à câmara aérea utilizada. Um dos objectivos do trabalho realizado consiste na aquisição deste género de

informação, para que esta possa ser utilizada em algumas das tarefas executadas no âmbito deste trabalho e em outros projectos que recorram às fotografias do RAF47.

O objectivo principal do trabalho efectuado consiste na experimentação de uma metodologia de trabalho cuja finalidade é a recuperação das imagens do voo RAF47 e a aquisição de informação relativa a este voo que possa ser utilizada no futuro. Esta metodologia foi testada sobre um conjunto de imagens referentes a uma pequena zona geográfica e, caso se verifique a sua eficácia, destina-se, talvez num trabalho futuro, a ser aplicada a toda a cobertura nacional.

A recuperação das fotografias compreende dois aspectos: a recuperação das características radiométricas e geométricas. A primeira parte será realizada através da construção de um programa em Matlab[®], com o objectivo de uniformizar a luminosidade entre imagens diferentes e no interior delas próprias. Para a recuperação da geometria, pretende-se realizar uma triangulação aérea, com o programa *ImageStation Automatic Triangulation*[®] da Intergraph (ISAT[®]) a fim de obter os parâmetros de orientação externa das imagens consideradas na zona de teste. Para a realização da triangulação são necessários vários dados, nomeadamente, os parâmetros de orientação interna. Um dos objectivos do trabalho realizado é encontrar a forma correcta de realizar a medição das marcas fiduciais, para que os referidos parâmetros possam ser determinados acertadamente, uma vez que não existe certificado de calibração da câmara utilizada. Pretende-se, ainda, construir uma rotina em Matlab[®] que permita a detecção automática das marcas fiduciais através de técnicas de processamento de imagem, para evitar a medição manual destas em todas as imagens consideradas no trabalho. A realização da triangulação aérea, para além da obtenção dos parâmetros de orientação externa, será utilizada para determinar parâmetros de auto-calibração, sendo, desta forma, obtido um modelo das distorções das lentes utilizadas na aquisição das fotografias.

Finalmente, pretende-se conjugar todas as informações e valores obtidos numa base de dados geográfica, construída em ArcGIS[®] da ESRI, onde os utilizadores das fotografias do voo RAF47 poderão facilmente aceder às informações necessárias para a realização dos seus trabalhos.

1.3. Organização do Trabalho

Esta dissertação encontra-se dividida em seis Capítulos, os quais estão divididos em vários subcapítulos.

Para além do presente Capítulo que contém o enquadramento do trabalho, onde é especificada a importância de trabalhar com imagens aéreas antigas, e uma breve descrição dos objectivos a atingir com o trabalho realizado; no segundo Capítulo, são expostas as informações recolhidas, durante a pesquisa efectuada, sobre os instrumentos que foram utilizados na aquisição das fotografias, nomeadamente, o avião, a câmara e as lentes.

O terceiro Capítulo é dedicado ao percurso que o voo RAF47 tem percorrido no Instituto Geográfico do Exército, desde que foi oferecido aos Serviços Cartográficos do Exército até ao início da realização deste trabalho. Este Capítulo contém, ainda, a descrição dos passos efectuados na primeira fase deste projecto, como a selecção e a preparação das imagens para estas começarem a ser trabalhadas.

O Capítulo número 4 descreve o funcionamento do algoritmo de tratamento de imagens, assim como os problemas que foram enfrentados na construção deste e os seus efeitos sobre as fotografias.

O quinto Capítulo é dedicado à triangulação aérea. Um primeiro subcapítulo é relativo à orientação interna, onde são descritos os problemas da sua realização e as respectivas soluções encontradas, devido ao facto de não existir certificado de calibração e, ainda, são expostos os fundamentos do programa construído para detectar automaticamente as marcas fiduciais. O subcapítulo da triangulação automática descreve o modo de aquisição de coordenadas foto dos pontos de passagem e de ligação utilizado pelo ISAT[®]. É descrita, noutro subcapítulo, a forma como foram adquiridas as coordenadas terreno dos pontos fotogramétricos e as dificuldades encontradas na obtenção das suas coordenadas foto. A realização da triangulação aérea também tem um subcapítulo próprio, no qual é exposta a forma de aquisição dos dados para realizar a triangulação e a análise dos resultados obtidos. O controlo de qualidade aos resultados da triangulação, realizado através do *ImageStation Stereo Display*[®] da Intergraph (ISSD[®]) e a construção da base de dados geográfica com os dados obtidos também se encontram neste Capítulo.

O Capítulo 6 contém as conclusões que foram adquiridas ao longo da realização do trabalho.

2. Capítulo II – Material Fotogramétrico Utilizado no Voo RAF47

2.1. Breve História da Fotografia Aérea

Alguns autores consideram que a fotogrametria teve início no século XV, com os estudos efectuados por Leonardo da Vinci em campos como a geometria, a óptica, a mecânica, a geofísica, os princípios da aerodinâmica e a projecção óptica. Muitos contributos foram dados por vários cientistas de diferentes países europeus ao longo dos séculos seguintes. Para além dos avanços ao nível da matemática, como a publicação das tabelas de logaritmos (por Napier) ou o desenvolvimento do cálculo diferencial e integral (por Newton e Leibnitz), novos conceitos relacionados com fotogrametria foram definidos, tais como, as leis da perspectiva (Dürer) e a estereoscopia (Kepler). Depois de ao longo do século XIX terem sido inventadas todas as componentes das câmaras fotográficas, a única “peça” que faltava para possibilitar a aquisição de fotografias era a capacidade de fixar a imagem num material de suporte [American Society of Photogrammetry, 1980].

A primeira tentativa com resultados aceitáveis foi realizada por Daguerre, em 1839, a qual consistia numa imagem positiva registada sobre placas de metal [American Society of Photogrammetry, 1952; American Society of Photogrammetry, 1980]. Com o passar dos anos, esta técnica foi evoluindo e os negativos passaram a ser constituídos por folhas de nitrocelulose cobertas por emulsão fotográfica. As folhas de nitrocelulose eram flexíveis e transparentes, o que as tornava ideais para a aquisição de fotografias. No entanto, o facto de esta substância se degradar facilmente e ser muito inflamável conduziu ao abandono deste material a partir de 1950 [George Eastman House, 2009]. A emulsão consistia numa mistura de uma solução de gelatina, iodeto e brometo de potássio com outra de amoníaco e nitrato de prata, juntamente com alguns sais de ferro e platina. De entre as várias reacções químicas que ocorriam quando estes compostos eram misturados sob a acção do calor, a que tinha mais relevância para o registo de imagens era a reacção do nitrato de prata com o brometo de potássio, dando origem a nitrato de potássio e a brometo de prata. Este último composto formava pequenos cristais que se depositavam sobre a gelatina. Se a solução fosse exposta à luz, o brometo de prata era decomposto nos dois iões que o compõem e, nas zonas iluminadas, formava-se um depósito de prata sólida. Depois de obtida a imagem latente, pelo

processo descrito, a placa era mergulhada num líquido alcalino, dissolvendo os sais existentes na zona que fora exposta à luz e deixando apenas a prata sólida que apresentava uma cor escura. Este processo é conhecido como banho de revelação. As zonas que não foram expostas à luz continuavam a apresentar a cor branca característica da solução inicial. Para tornar a placa insensível à acção da luz, esta era mergulhada num líquido ácido para dissolver a restante solução ainda intacta que permanecera nas zonas que não tinham sido expostas à luz. Através deste processo – banho de fixação – as zonas não iluminadas ficavam transparentes. Desta forma era possível obter um negativo, do qual, posteriormente, se podia derivar um positivo. Esta derivação era obtida através da colocação do negativo sobre uma placa ou um papel sensível à luz. Iluminando o conjunto, a luz atravessava apenas as zonas transparentes do negativo e era formado o depósito de prata sobre a placa ou papel apenas nestas localizações. À semelhança da obtenção do negativo, o resultado era também revelado e fixado, adquirindo-se, assim, uma imagem análoga à realidade. A substância sensível à luz era formada por partículas de apenas alguns micrómetros de diâmetro. Quanto maior fosse a quantidade de energia luminosa que atingisse uma determinada zona, maior seria o número de partículas que se decompunham, dando origem a uma cor mais escura. Este processo permitia obter imagens com diferentes tons de cinzento [Servicio Geográfico del Ejército, 1953].

A ideia de utilizar fotografias para a produção de cartas nasceu em França, em 1849. Laussedat realizou as primeiras tentativas de obtenção de fotografias aéreas através da utilização de papagaios (Figura 2.1) e de balões, os quais transportavam uma câmara aérea [American Society of Photogrammetry, 1952; Wolf, 1974].

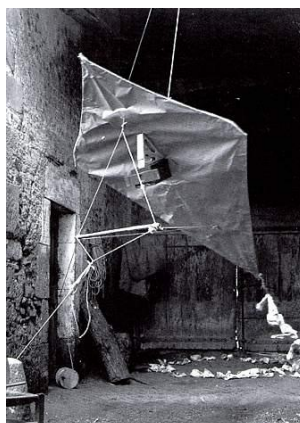


Figura 2.1 – Câmara num papagaio para obtenção de fotografias aéreas, retirada de Northstar Gallery (2005).

No entanto estas experiências foram abandonadas devido à dificuldade em obter um número suficiente de fotografias, a partir de uma única estação, para cobrir toda a área desejada. As fotografias aéreas foram, então, substituídas por fotografias terrestres, obtidas através de aparelhos como o fototeodolito, permitindo a construção de plantas e mapas. Nos anos seguintes, muitos aparelhos foram inventados para permitir a utilização de fotografias em trabalhos topográficos. No entanto, o maior avanço foi dado quando surgiram os primeiros veículos aéreos dirigíveis, como os Zepelins, pois permitiam controlar a posição a partir da qual a fotografia aérea era obtida (o que não era possível com balões ou papagaios). A primeira vez que um avião foi utilizado para obter fotografias aéreas, para serem utilizadas na construção de mapas, foi em 1913. Contudo, o grande avanço da fotogrametria verificou-se durante as duas Guerras Mundiais, quando a fotografia aérea se tornou numa das mais poderosas armas ao dispor dos países envolvidos no conflito. As imagens aéreas, durante estes dois períodos, foram principalmente utilizadas para operações de reconhecimento. Depois do fim de qualquer uma das duas Guerras, vários países europeus apresentavam um grande grau de destruição e a necessidade de planeamento da reconstrução era urgente. Para tal, era fundamental a existência de mapas actualizados, o que levou a uma elevada produção de mapas através de fotografias aéreas [American Society of Photogrammetry, 1952; Wolf, 1974].

2.2.O Avião Mosquito PR Mk 34

Os aviões utilizados pela RAF durante a Segunda Guerra Mundial eram construídos para fins bélicos, mas como se verificou que as fotografias aéreas eram uma ferramenta essencial para estudar os movimentos inimigos, tornou-se necessário adaptar estes aparelhos para a obtenção de imagens aéreas.

Para obter imagens com qualidade suficiente para permitir detectar informação relevante, tendo em conta as câmaras aéreas disponíveis, os voos tinham de ser efectuados a uma altitude relativamente baixa. A câmara mais utilizada durante essa época era a F-24, a qual era utilizada com lentes que apresentavam distâncias focais de 127 mm ou 203,2 mm, forçando a que os voos fossem realizados a altitudes próximas dos 3000 m. Para além da baixa altitude de voo, para que a qualidade das fotografias fosse satisfatória, estes tinham de ser realizados em condições atmosféricas favoráveis à obtenção de fotografias, o que colocava os aparelhos em perigo de serem atingidos. Para contornar estes problemas, foi necessário,

não só produzir câmaras com distâncias focais maiores, mas também utilizar aviões com a capacidade de voar a alturas superiores e com maior velocidade. O modelo de avião seleccionado, na RAF, para desempenhar esta tarefa foi o Spitfire. A fim de adaptar o avião à sua nova finalidade, foi necessário remover todo o equipamento de bombardeamento, para que fosse possível montar duas F-24, uma em cada asa do aparelho [Evidence in Camera, 1945].

No entanto, a adaptação de aviões de guerra à aquisição de fotografias aéreas não se limitava à montagem de câmaras aéreas. Os novos desafios encontrados forçaram a introdução de muitas outras alterações. O facto de os voos serem realizados a alturas bastante elevadas (cerca de 9000 m) e durante um período de tempo relativamente prolongado, mostrou as insuficiências dos sistemas de oxigénio utilizados até à época. Foi, também, necessário desenvolver sistemas de navegação mais exactos, sistemas de aquecimento para evitar a congelação dos componentes da câmara (a temperatura passou a ser menor que a habitual devido ao aumento da altitude de voo), sistemas para impedir que a vibração do avião afectasse as imagens obtidas e a utilização de espelhos colocados em frente à objectiva numa posição oblíqua relativamente ao eixo óptico. Esta última modificação era particularmente importante aquando da realização de voos a baixa altitude para permitir obter fotografias pormenorizadas dos edifícios bombardeados [Mera, 1942; Evidence in Camera, 1945].

De todos os aviões da RAF que realizaram voos de reconhecimento durante a Segunda Guerra Mundial, muitos continuaram a desempenhar esta tarefa depois de o conflito ter terminado. O avião que fez o voo denominado por RAF47, em Portugal, recebia o nome de RS202 e pertencia ao esquadrão 58, conforme testemunhado pelo documento representado na Figura 2.2.

SURVEY PHOTOGRAPHIC RECONNAISSANCE REPORT
(TO BE COMPLETED FOR EACH MAGAZINE.)

Date 7-8-42... Sortie CP/BA/141... Aircraft RS.202 Squadron 58...
Part No.

Type and Position of Camera.	<u>K-17. Real 9-57</u>	Focal Length in Millimetres	<u>152.4.</u>
Camera Number and Letter	<u>414. AF42-44163</u>	Film Batch No. and Date of Coating.	<u>58501-18 16-1-42.</u>
Magazine Number and Letter.	<u>414.B. 42-19879</u>	Length of Film Loaded (Exposures)	<u>205</u>

Figura 2.2 – Documento com a identificação do avião utilizado, adaptado de Redweik *et al.* (2009).

O esquadrão N.º 58 foi criado em 1916 [RAF, 2004] e ao longo da sua existência foram vários os modelos de aviões que pertenceram a este grupo. A Tabela 2.1 apresenta todos os modelos de avião que fizeram parte deste esquadrão e os intervalos de tempo em que esta participação ocorreu.

Tabela 2.1 – Modelos de aviões pertencentes ao esquadrão N.º 58 [Barrass, 2007].

Modelo	Data de Início	Data de Fim
FE2b	Dezembro 1917	Outubro 1919
O/400	Setembro 1918	Janeiro 1920
Vimy	Julho 1919	Janeiro 1920
Vimy	Abril 1924	Maio 1925
Virginia V	Dezembro 1924	Novembro 1926
Virginia III	Março 1925	Abril 1926
Virginia VI	Julho 1925	Maio 1927
Virginia VII	Agosto 1926	Setembro 1930
Virginia IX	Abril 1927	Abril 1930
Virginia X	Janeiro 1928	Janeiro 1936
Anson I	Fevereiro 1937	Novembro 1937
Whitley I	Outubro 1937	Abril 1938
Whitley II	Outubro 1937	Julho 1939
Whitley III	Maio 1939	Abril 1940
Whitley V	Março 1940	Dezembro 1942
Whitley VII	Junho 1942	Dezembro 1942
Heyford II	Abril 1939	Maio 1939
Halifax II	Dezembro 1942	Março 1945
Halifax III	Março 1945	Maio 1945
Mosquito PR Mk 34	Outubro 1946	Dezembro 1947
Mosquito PR Mk 34	Abril 1949	Agosto 1951
Mosquito PR Mk 34A	Julho 1951	Dezembro 1953
Mosquito PR Mk 35	Novembro 1951	Março 1954
Anson C Mk 11	Outubro 1946	Julho 1947
Anson C Mk 19	Julho 1947	Dezembro 1951
Lincoln B Mk 2	Novembro 1950	Outubro 1951
Camberra PR Mk 3	Dezembro 1953	Outubro 1955
Camberra PR Mk 7	Janeiro 1955	Setembro 1970
Camberra PR Mk 9	Janeiro 1960	Novembro 1962
Hunter FGA Mk 9	Agosto 1973	Julho 1976

Analisando as datas em que cada um dos modelos esteve operacional neste esquadrão, foi possível concluir que o único modelo que poderia ter realizado o voo RAF47 em Portugal foi o Mosquito PR Mk 34, uma vez que, de acordo com Redweik *et al.* (2009), o voo foi efectuado entre os meses de Maio e Agosto de 1947.

A utilização do modelo Mosquito (Figura 2.3) para fins fotogramétricos trouxe grandes vantagens à RAF durante a Segunda Guerra Mundial. Este tipo de aviões permitia atingir maiores velocidades, altitudes e distâncias. Estes factores permitiram que, depois da adaptação do Mosquito aos fins fotográficos, fossem fotografadas algumas zonas cujas imagens seria impossível obter a partir do Spitfire como, por exemplo, o norte da Noruega ou a zona este da Alemanha. Este tipo de aviões era totalmente construído em madeira (razão que levou as primeira tentativas de construção deste modelo a não serem aprovadas pelo Ministério responsável) e continha dois motores Rolls Royce Merlin. Apesar de o primeiro exemplar deste modelo ter ficado operacional em Novembro de 1940, só a partir de Julho de 1941 este foi integrado na Unidade de Reconhecimento Fotográfico. Este modelo de avião não transportava armamento e possuía apenas uma câmara aérea, a qual era colocada no “nariz” do avião [Evidence in Camera, 1945; RAF, 2009].



Figura 2.3 – Avião do modelo Mosquito pertencente à RAF, retirada de RAF (2009).

2.3.A Câmara Fotográfica K-17

Segundo a mesma fonte que permitiu a identificação do avião utilizado no voo RAF47, a câmara com que foram obtidas as fotografias foi uma Fairchild K-17 (Figura 2.4).

Devido à determinação em ajudar o seu país durante a Segunda Guerra Mundial, Sherman Fairchild introduziu algumas melhorias nas câmaras aéreas existentes. O seu contínuo esforço para melhorar os aparelhos levaram à fundação da *Fairchild Aerial Camera Corporation* em 1920. Enquanto o exército norte-americano reconheceu facilmente a utilidade das câmaras aéreas nas suas actividades, as empresas de cartografia foram mais difíceis de convencer. Devido ao seu interesse neste ramo, Sherman Fairchild fundou várias

outras companhias relacionadas com este tema, incluindo a *Fairchild Airplane Manufacturing Corporation*, cujo objectivo era o desenvolvimento de aviões mais apropriados para a obtenção de fotografias aéreas para serem usadas na construção de cartas [Whittier College, 2007; Butler County Warbirds, 2009].

SURVEY PHOTOGRAPHIC RECONNAISSANCE REPORT (TO BE COMPLETED FOR EACH MAGAZINE.)			
Date.....7-8-42.....Sortie.....C/E/AA/141.....Aircraft.....R3.202.....Squadron.....58..... Part No.....7.....			
Type and Position of Camera.	K-17. Real 8x10	Focal Length in Millimetres	152.4.
Camera Number and Letter	414. AF42-44163	Film Batch No. and Date of Coating.	58501-18 16-1-42.
Magazine Number and Letter.	414-B. 42-19879	Length of Film Loaded (Exposures)	205

Figura 2.4 – Documento com a identificação da câmara utilizada, adaptado de Redweik *et al.* (2009).

De todas as câmaras desenvolvidas pela Fairchild Aerial Camera Corporation, a K-17 (Figura 2.5) foi uma das mais utilizadas.



Figura 2.5 – Câmara aérea K-17 com uma objectiva de 6”, retirada de Evidence in Camera (1945).

As fotografias obtidas com esta câmara podiam ser utilizadas para diversos fins, tais como estereorrestituição, construção de cartas aeronáuticas e de mosaicos. A diversidade de

aplicações desta câmara devia-se ao facto de os seus componentes serem facilmente desmontáveis e à possibilidade de anexar à câmara componentes diferentes consoante o objectivo do voo realizado [American Society of Photogrammetry, 1944].

Os tipos de filme que normalmente eram utilizados com a K-17 eram o A-5, o A-5A ou o A-9. Qualquer um destes filmes permitia obter negativos com 22,86 cm × 22,86 cm (9" × 9"). Contudo, o facto de os dois primeiros rolos possibilitarem a aquisição de, no máximo, 250 imagens, enquanto o terceiro permitia a obtenção de 500 imagens e, dado que não foram encontradas, ao longo da realização deste trabalho, imagens com numeração superior a 250, leva a concluir que a probabilidade de o filme utilizado ter sido o A-5 ou o A-5A é maior que a de ter sido o A-9. Um dos aspectos mais importantes, no que diz respeito ao filme fotográfico, é a sua planificação. Se este não estiver perfeitamente plano, a imagem fica distorcida. A câmara utilizada no voo RAF47 realizava a planificação do filme através de vácuo [American Society of Photogrammetry, 1944].

O objectivo de um obturador era evitar que a luz atingisse o filme fotográfico, excepto durante a execução da fotografia. A característica principal desta componente era a sua velocidade, a qual era expressa pelo intervalo de tempo entre o instante em que o obturador começava a permitir a passagem da luz e o instante em que esta deixava de passar. Quanto menor fosse este intervalo de tempo, melhores seriam os resultados obtidos, uma vez que se o tempo de exposição fosse demasiado elevado, como a câmara se movia relativamente ao terreno, a imagem mostraria um efeito de arrastamento. O obturador utilizado pela K-17 era um obturador entre as lentes, sendo este o tipo de obturador com maior durabilidade e o mais apropriado para a obtenção de imagens destinadas à produção de cartografia. Neste tipo de obturador, as lâminas que o constituíam situavam-se entre os elementos anterior e posterior das lentes. A velocidade do obturador utilizado com a câmara K-17 com uma objectiva de 6" (a câmara utilizada no voo RAF47) podia ser de 1/50, 1/100, 1/200 ou 1/300 de um segundo [American Society of Photogrammetry, 1944].

Outro componente das câmaras aéreas utilizadas na década de 40 do século XX era o intervalómetro (Figura 2.6). A função destes consistia no controlo do sistema de propulsão da câmara para a execução de fotografias. Nas câmaras em que era utilizado este aparelho, operações como a abertura e fecho do obturador, o transporte do filme (para ficar exposta a zona do rolo correspondente ao negativo seguinte) e a planificação deste eram realizadas sequencialmente, no menor intervalo de tempo possível. Após a realização de todos os passos, a câmara ficava parada e só depois de passar o intervalo de tempo destinado à aquisição de cada imagem, o sistema voltava a funcionar [Mera, 1942].

O regulador de sobreposição também era extremamente importante, pois para além de permitir controlar a sobreposição entre imagens consecutivas, este oferecia a possibilidade de observar a área que estava a ser fotografada (permitia verificar se as fotografias correspondiam à zona desejada) e verificar o ângulo de deriva do avião, isto é, permitia controlar o desvio do avião relativamente à direcção de voo causado por ventos fortes (através das marcas visíveis na Figura 2.6) [American Society of Photogrammetry, 1944].



Figura 2.6 – Intervalómetro (esquerda) e regulador de sobreposição (direita), retiradas de American Society of Photogrammetry (1944).

Para além dos componentes acima descritos, a K-17 apresentava, ainda, o corpo da câmara, o qual consistia na estrutura onde se encontravam o mecanismo de funcionamento da câmara, o motor desta e ligações eléctricas. O mecanismo de funcionamento da câmara era a sua fonte de energia. Existia, também, um *magazin* com o filme fotográfico, o qual para além de armazenar o filme, era responsável pela deslocação deste entre as várias exposições, sendo extremamente importante que a quantidade de filme movimentada fosse adequada, para evitar desperdício de rolo e sobreposição de imagens [American Society of Photogrammetry, 1944].

2.4.As Lentes Metrogon

Os cones com objectivas que podiam ser utilizados com a K-17 eram os que apresentavam objectivas de 6", 12" e 24". No caso do voo realizado em Portugal, a objectiva utilizada foi uma Metrogon de 6". A câmara K-17, quando utilizada em conjunto com este

tipo de objectiva, passava a ser denominada por K-17B, sendo a sua constante igual a 152,4 mm [American Society of Photogrammetry, 1944; Redweik *et al.*, 2009].

Uma lente é um objecto transparente limitado por duas superfícies esféricas, normalmente de vidro, que é utilizado para formar imagens dos objectos sobre determinadas superfícies, como, por exemplo, filme fotográfico. Não existem lentes perfeitas. Todas elas apresentam defeitos, os quais provocam distorções nas imagens adquiridas através delas. As distorções surgem quando uma quadrícula no plano objecto aparece representada por curvas, as quais podem apresentar a sua concavidade – distorção negativa – ou a sua convexidade – distorção positiva – voltada para o centro [Servicio Geográfico del Ejército, 1953]. Uma vez que as distorções implicam que os pontos representados na imagem não estão situados na sua localização correcta, estas causam graves problemas aos fotogrametristas. As distorções podem ser divididas em duas componentes: radiais ou tangenciais. As distorções radiais consistem no deslocamento radial do ponto, ou seja, no deslocamento deste ao longo de semi-rectas com origem no centro da imagem, para qualquer direcção. As distorções tangenciais são aquelas em que o deslocamento do ponto é verificado nas direcções perpendiculares às das rectas radiais [American Society of Photogrammetry, 1980].

As lentes Metrogon eram construídas pela empresa Bausch & Lomb e eram o tipo de lentes mais utilizado para obter fotografias aéreas destinadas à produção de cartografia. Durante a Segunda Guerra Mundial, as lentes Metrogon eram produzidas em quantidades elevadas, e nem sempre com a qualidade requerida, devido à necessidade de obter rapidamente materiais que permitissem desempenhar tarefas como o reconhecimento e a produção de cartografia militar. De acordo com a American Society of Photogrammetry (1952), depois da guerra, muitas destas lentes foram instaladas em câmaras aéreas de grande precisão, tendo sido obtidos resultados insatisfatórios, porque a maioria destas lentes apresentavam distorções tangenciais excessivas, o que provocava erros irreparáveis durante a estereorrestituição. As distâncias focais destas lentes poderiam ser 3"; 4"; 5,2"; 6" ou 12". Como já foi dito, no caso do voo RAF47 realizado em Portugal, a distância focal das lentes usadas foi de 6", ou seja, 152,4 mm. As distorções apresentadas por lentes Metrogon durante testes realizados pelo *National Bureau of Standards* (Estados Unidos da América) encontram-se na Tabela 2.2. Os valores apresentados mostram a distância entre um ponto da imagem e a localização deste se a imagem não apresentasse distorções, em função da distância ao centro a que se encontra o referido ponto. Os valores positivos correspondem a um afastamento do centro da imagem, enquanto os negativos estão relacionados com uma aproximação a este. A

incerteza dos valores apresentados é de 0,02 mm [American Society of Photogrammetry, 1952].

Tabela 2.2 – Distorções das lentes Metrogon [American Society of Photogrammetry, 1952].

Distância ao Centro (graus)	Distorção (mm)
5	0
10	0
15	0,02
20	0,04
25	0,08
30	0,11
35	0,12
40	0,07
45	-0,15

No que diz respeito às distorções tangenciais, já foi demonstrado através de afirmações presentes em literatura contemporânea do voo, que as lentes Metrogon não obedeciam às exigências requeridas para a aquisição de fotografias destinadas à produção cartográfica. Quanto às distorções radiais, a Tabela 2.3 apresenta os respectivos valores máximos para várias marcas de lentes. A comparação entre os diversos valores mostra que a distorção radial máxima das lentes Metrogon é bastante superior à da maioria das restantes marcas, o que indica que, de todas as lentes apresentadas, estas encontram-se entre as que fornecem os piores resultados [American Society of Photogrammetry, 1980].

Tabela 2.3 – Distorção Radial Máxima de lentes de várias marcas [American Society of Photogrammetry, 1980].

Lentes	Distorção Radial Máxima (mm)
Metrogon	0,110
Planigon (ou Cartogon)	0,025
Planigon	<0,010
Geocon I	0,010
Geocon IV	0,005
S-Pleogon A	0,007
Pleogon A	0,002
Pleogon AR	0,005
Toparon A	0,004
Topar A	0,003
Topar AR	0,003
Biogon	0,025 - 0,035
Rigel	0,120
Telikon A	0,050
Topar	0,005
Universal Aviogon	0,005
Universal Aviogon I	0,004
Universal Aviogon II	0,004
Aviotar I	0,004
Aviotar II	0,004
Astrotar	0,026
Infragon	0,010
Infratar	0,004
Super Aviogon	0,030
Super Aviogon II	0,010
Orbigon	0,004

3. Capítulo III – O Percurso do Voo RAF47 no Instituto Geográfico do Exército

3.1. Aquisição do Voo

Durante a Segunda Guerra Mundial, a fotogrametria evoluiu bastante, tendo-se tornado numa das mais valiosas armas à disposição de cada uma das partes envolvidas no conflito [Redweik *et al.*, 2009]. Para além do rápido desenvolvimento tecnológico que se verificou nesta área durante esta época, nomeadamente na evolução das câmaras aéreas, a interpretação fotográfica ganhou uma importância vital neste período. Para tentar prever os ataques inimigos e minimizar as suas consequências, era necessário conhecer com exactidão a localização dos edifícios militares e vigiar constantemente todos os movimentos efectuados nas suas imediações. Esta necessidade conduziu à adaptação de muito do material fotogramétrico existente na altura, principalmente das câmaras que, entre outras modificações, passaram a apresentar distâncias focais superiores às apresentadas até à data, pois a fim de ficar fora do alcance dos inimigos, os voos tinham de ser feitos a alturas mais elevadas. Foram, ainda, desenvolvidas, durante este período, técnicas para a obtenção de fotografias nocturnas e o movimento do negativo para compensar o arrastamento visível nas imagens devido à velocidade do avião em voos de baixa altitude [Evidence in Camera, 1945].

A interpretação fotográfica desempenhou um papel vital durante a Segunda Guerra Mundial, mas não perdeu a sua importância após o fim do confronto. Em 1945, muitos países europeus estavam completamente destruídos. A necessidade de uma cuidadosa avaliação da extensão dos danos e do planeamento da reconstrução fez com que a interpretação fotográfica não caísse no esquecimento. Nos anos posteriores à Guerra, era comum efectuar voos fotográficos com estes fins [Remote Sensing and Photogrammetry Society, 2008].

Depois do fim da Guerra, a *British Royal Air Force* realizou vários voos fotogramétricos sobre a Península Ibérica. As imagens referentes a Portugal foram adquiridas entre os meses de Maio e Agosto de 1947, tendo sido adquiridas aproximadamente 12000 fotografias. As razões que levaram a RAF à aquisição destas imagens não são conhecidas, mas existe a possibilidade de que estas não tenham sido adquiridas para aquisição de informação estereoscópica, mas sim para a construção de mosaicos [Redweik *et al.*, 2009]. Um mosaico é um conjunto de fotografias aéreas individuais organizadas de forma a

parecerem uma única fotografia onde está representada toda a área fotografada. É impossível criar um mosaico perfeito, devido às variações na altitude e na atitude do avião e ao relevo da área fotografada. No entanto, apesar de a exactidão dos mosaicos poder variar consoante a técnica utilizada na sua construção, já na época em que as imagens foram obtidas, era possível construir mosaicos com a exactidão exigida a uma carta. A utilização deste género de produtos é bastante vantajosa, uma vez que permite a análise de vários aspectos da zona de estudo sem ser necessário realizar muitas campanhas de campo, as quais envolvem sempre custos elevados. Os mosaicos construídos a partir de fotografias aéreas valorizam mais a posição relativa dos elementos que a sua posição absoluta [American Society of Photogrammetry, 1952].

Durante o ano de 1948, os rolos de filme fotográfico onde foram registadas as fotografias foram oferecidos aos Serviços Cartográficos do Exército [Alves, 1950a]. O facto de várias instituições civis terem conseguido autorização superior para ter acesso a provas destas imagens, fez com que, nos anos seguintes, estas fossem frequentemente utilizadas. A entidade mais interessada nas fotografias do voo RAF47 foi o Ministério da Economia, ao qual foram fornecidas 4600 provas deste voo em 1949 e 1174 no ano seguinte. As referidas imagens foram de grande utilidade, principalmente, para os Serviços Florestais e Agrícolas [Alves, 1950a; Alves, 1950b].

A interpretação de fotografias aéreas não tinha apenas aplicações militares. Esta fonte de informação era de grande importância para a monitorização de zonas florestais, por exemplo. Através desta ferramenta era possível conhecer quais as zonas do país cobertas por floresta, quais as espécies existentes, identificar zonas onde exista um elevado número de árvores mortas e permitia, ainda, o planeamento de acções como reflorestação e construção de acessos. Para além das florestas, existiam outras actividades civis onde a interpretação de fotografias aéreas podia ser utilizada, tais como, a hidrologia e a agricultura [American Society of Photogrammetry, 1960].

A Companhia Nacional de Electricidade também achou vantagem na utilização das fotografias, tendo sido obtidas 58 provas das imagens para esta entidade durante o ano de 1950. O Estado-Maior Naval mostrou interesse na cobertura aérea, tendo adquirido imagens referentes a toda a zona costeira do continente. Para além das entidades referidas, algumas provas foram, ainda, utilizadas por câmaras municipais.

Simultaneamente à obtenção das provas, foi realizado um enquadramento referente a este voo, onde as fotografias foram localizadas na carta 1:50000 [Alves, 1950a; Alves, 1950b]. Ainda existe, nos arquivos do IGeoE, um outro enquadramento antigo das fotografias

Recentemente, estas folhas de papel vegetal foram digitalizadas e enquadradas sobre um cartograma da carta 1:25000, em formato digital. Esta nova versão do enquadramento serviu de base para a selecção das imagens a utilizar na realização do presente projecto.

3.2. Arquivo e Conservação das Imagens

Quando o voo foi doado aos Serviços Cartográficos do Exército, em 1948, estes estavam instalados num edifício destinado a habitação familiar situado na Estrada de Benfica, o qual não possuía as condições ideais para esta instituição funcionar em pleno [Alves, 1948]. De acordo com Alves (1948), “o depósito de filmes voados” estava “instalado no quintal, no antigo galinheiro do prédio, que sofreu a necessária adaptação, ficando todavia em condições deficientes”. É bastante provável que o voo RAF47 também tenha estado guardado nestas condições, que apesar de insuficientes, eram as melhores que se podiam ter com os meios que se encontravam disponíveis.

Em 1959, o Serviço Cartográfico do Exército (antigos SCE) instalou-se num edifício situado na Rua da Escola Politécnica [Dias e Rossa, 2007], tendo sido transportado para as novas infra-estruturas todo o material fotográfico, incluindo o referente ao voo RAF47. Para além da mudança de instalações, que é sempre uma fonte de problemas para a conservação de património, devido ao perigo de extravio e às possíveis condições de transporte inapropriadas, foi nas referidas instalações que o voo RAF47 enfrentou o maior desafio à sua sobrevivência, até à data. Em 1975, ocorreu um incêndio no edifício, o qual teve início na Secção de Fotografia e Cinema onde o voo se encontrava guardado.

Em 1975, o voo RAF47 foi transportado para as actuais instalações do Instituto Geográfico do Exército. No novo edifício, os cilindros metálicos onde se encontram os rolos de filme fotográfico deste voo estão guardados numa divisão própria para armazenamento deste género de materiais e destinada apenas a este fim. Esta divisão tem um sistema de refrigeração próprio. As condições atmosféricas da câmara fria são cuidadosamente controladas, sendo efectuadas leituras diárias da temperatura e da humidade em que se encontra o seu interior. O interior da câmara encontra-se sempre a uma temperatura de aproximadamente 13°C e com uma humidade relativa de 23%. Comparativamente à Sala de Arquivos, onde se encontram guardados negativos originais de outros voos, os valores da câmara fria são mais baixos. Esta última sala apenas tem um ar condicionado normal e um

aparelho para medição de humidade e, normalmente, apresenta uma temperatura de 18°C e uma humidade relativa de, aproximadamente, 41%. Segundo os funcionários do IGeoE, a necessidade de condições especiais de armazenamento do RAF47 é devida ao facto de existir o risco de alguns dos rolos poderem explodir.

O percurso do voo RAF47, ao longo destes 62 anos, não tem sido isento de problemas. Os rolos de filme fotográfico estiveram sujeitos a condições deficientes de armazenamento, mudanças de instalações e a um incêndio. No entanto, apesar de todos os contratemplos, muitos dos rolos chegaram aos dias de hoje em bom estado de conservação.

3.3. Digitalização das Imagens

Recentemente, a fim de preservar a cobertura aérea, os vários rolos de filme fotográfico do RAF47 que ainda existem no IGeoE foram digitalizados. O scanner utilizado para digitalização das imagens foi um Intergraph PhotoScan TD1000 [Redweik *et al.*, 2009]. Este aparelho encontra-se também numa sala com condições atmosféricas controladas, para preservar os negativos e os rolos que são digitalizados todos os dias.

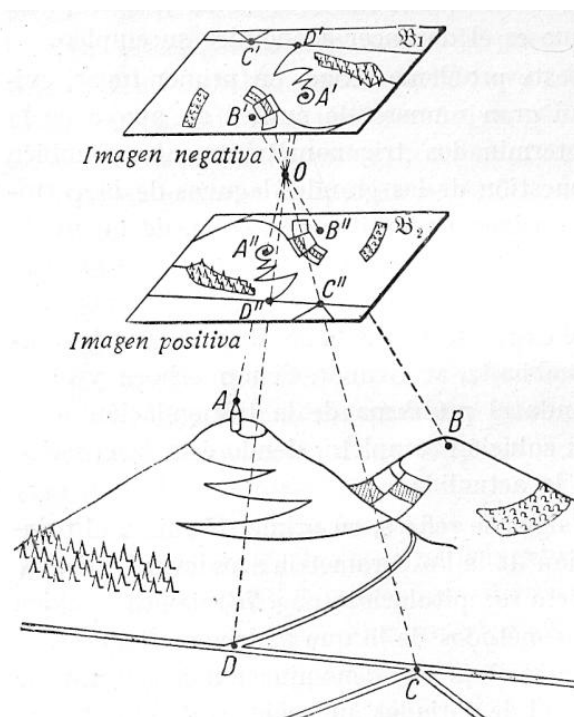


Figura 3.2 – Relação entre o centro de projecção, o negativo e o positivo, retirada de Schwidefsky (1943).

Os rolos de filme fotográfico contêm registados os negativos obtidos durante o voo. O negativo é a imagem obtida do lado oposto ao objecto, relativamente ao centro de projecção [Gruber, 1931]. Como se pode observar na Figura 3.2, as posições relativas entre as representações dos objectos no negativo estão invertidas relativamente às suas posições reais. Para além das posições, também as tonalidades estão invertidas. Por exemplo, um objecto que na realidade apresente uma cor clara, no negativo estará representado a escuro. Estes dois fenómenos não se verificam no positivo. Este é a imagem que se obtém quando se coloca um plano entre o objecto e o centro de projecção e em que a distância entre o centro de projecção e cada um destas duas imagens é a mesma [Gruber, 1931; Schwiddefsky, 1943].

Os scanners fotogramétricos actuais, aquando da digitalização, permitem que o operador escolha se a imagem que quer registar corresponde ao negativo ou ao positivo. No caso do RAF47, os resultados da digitalização foram guardados como positivos.

A resolução radiométrica corresponde ao número de níveis de cinzento utilizados para representar uma imagem [Mather, 1999]. As imagens do RAF47 foram digitalizadas usando 256 níveis de cinzento, onde o número digital 0 corresponde ao preto e o 255 ao branco. Trata-se, portanto, de imagens de 8 bits, uma vez que são necessários 8 bits de memória para guardar o maior valor de cinzento que um pixel da imagem pode apresentar [Mather, 1999].

O aspecto mais importante no que diz respeito à digitalização de imagens é a resolução da digitalização. Esta, normalmente, é medida em *dpi*. Esta unidade indica o número de pixels representados numa polegada. As imagens do RAF47 foram digitalizadas utilizando um pixel quadrado e com uma resolução de 1209,24 *dpi*, o que resultou num pixel com 21 μm \times 21 μm . Tendo em conta a escala aproximada das imagens, conclui-se que cada pixel da imagem representa cerca de 60 cm no terreno.

O scanner utilizado permitia a digitalização com um pixel menor, o qual deveria permitir a distinção de um maior número de pormenores. No entanto, a resolução dos negativos originais não era suficiente para garantir um resultado aceitável [Redweik *et al.*, 2009].

3.4. Selecção e Análise das Fotografias Aéreas da Zona de Estudo

A fim de procurar uma metodologia para a recuperação das características radiométricas e geométricas das fotografias do voo RAF47, foi definida uma zona de teste, tendo a metodologia sido aplicada às imagens que abrangem essa área. A zona seleccionada

corresponde à região de Lisboa e apresenta uma área de aproximadamente 40 km × 40 km (Figura 3.3).

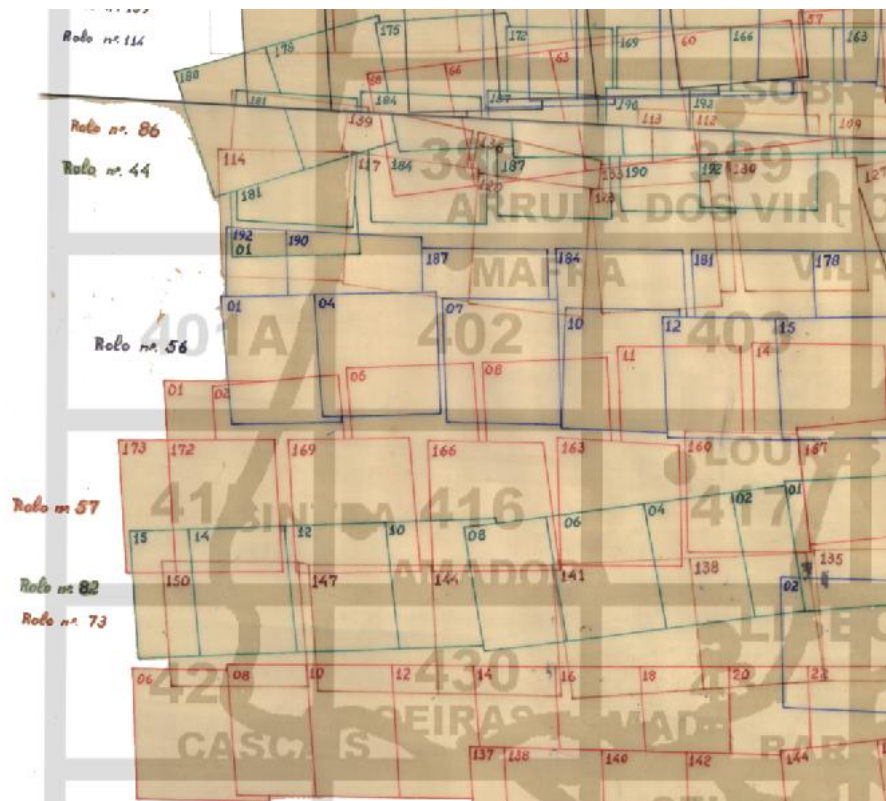


Figura 3.3 – Zona seleccionada para testar a metodologia de trabalho (IGeoE).

Mais pormenorizadamente, a zona de estudo corresponde à área representada nas folhas 388, 389, 401A, 402, 403, 415, 416, 417, 429, 430 e 431 da carta 1:25000. Através do enquadramento digitalizado existente no IGeoE, foi possível seleccionar as imagens nas quais se encontra representada a zona seleccionada (Tabela 3.1).

No total, foram seleccionadas 169 imagens pertencentes a 13 fiadas, todas com direcção Oeste – Este. Das 13 fiadas consideradas, 8 foram voadas de Este para Oeste, enquanto as restantes 5 foram obtidas no sentido oposto. Este conjunto de imagens não foi o seleccionado inicialmente, pois a existência de um erro no enquadramento apresentado induziu a uma selecção errada de imagens. Foi necessário comparar todas as imagens que pareciam estar situadas nos limites da zona de trabalho com a carta 1:25000 e verificar quais as que realmente se encontravam na zona de trabalho. Estas comparações foram, posteriormente, utilizadas para corrigir o enquadramento.

Tabela 3.1 – Número de fotografias por fiada e número dos respectivos rolos.

Fiada	Número do Rolo	Número de Fotos
1	44	17
2	96	10
3	44	10
4	86	5
5	86	12
6	86	9
7	56	14
8	56	16
9	57	15
10	57	16
11	82	15
12	73	15
13	38	15

169

Após a digitalização, as imagens foram guardadas com o formato *MrSID*. O primeiro passo do trabalho foi a conversão de todas as imagens para o formato *tiff*, através da aplicação *MrSIDViewer*, para que estas pudessem ser trabalhadas mais facilmente.

Uma vez que as imagens foram digitalizadas a partir de rolos, estas ainda apresentavam as margens e, em alguns casos, excertos das imagens adjacentes. Como as fotografias não têm qualquer tipo de informação marginal, pois tanto o número (na maioria dos casos), como as marcas fiduciais estão situados sobre a imagem, para evitar futuros problemas no desempenho dos programas desenvolvidos para tratamento de imagem e detecção automática de marcas fiduciais, as imagens foram cortadas de forma a deixarem de possuir margem.

Outra operação efectuada sobre as imagens durante esta fase foi a sua rotação. Independentemente do sentido de voo, as fotografias foram todas digitalizadas na mesma posição, logo algumas destas encontravam-se rodadas, tendo sido necessário repor as suas orientações correctas. Esta tarefa foi facilitada pela existência do enquadramento acima mencionado e pelo facto de, como será explicado mais detalhadamente no capítulo dedicado à Orientação Interna, duas das marcas fiduciais darem informação sobre o sentido de voo. Sendo conhecido o sentido da fiada através do enquadramento, bastou verificar se as marcas fiduciais se encontravam correctamente posicionadas para determinar se a imagem estava rodada ou não.

Durante a realização das operações descritas, foi necessário trabalhar sobre cada uma das 169 imagens de forma independente. Desta forma foi possível identificar diversos

problemas existentes na cobertura aérea, sendo os mais significativos os problemas de contraste e luminosidade em praticamente todas as imagens, a existência de nuvens em duas imagens, riscos em três imagens (determinadas zonas estavam assinaladas sobre os negativos originais), dobragens em duas imagens, manchas provocadas pelo Sol e pedaços de película arrancados em três fotografias (Figura 3.4).

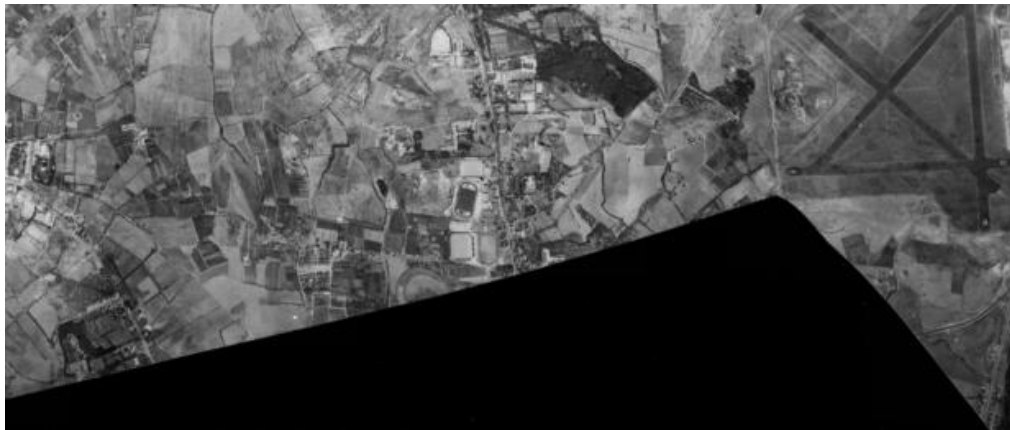


Figura 3.4 – Excerto de imagem onde falta um pedaço de película (IGeoE).

Nesta fase inicial do trabalho foi verificado se existia alguma zona da cobertura aérea referente à área de estudo que apresentasse lacunas fotográficas ou estereoscópicas. Foi observado que nenhuma das imagens necessárias para a realização do trabalho estava em falta e que, em todas as fiadas, existia uma zona comum a cada três imagens, tendo-se observado que a sobreposição longitudinal era aproximadamente constante ao longo de toda a cobertura. Quanto à sobreposição lateral, mesmo através do enquadramento, foi possível concluir que esta variava bastante na zona de estudo. Desde situações em que havia imagens que eram quase coincidentes, como nas fiadas 1 e 2, até ao caso das fiadas 12 e 13 em que a sobreposição lateral era quase inexistente, verificava-se uma grande variação de valores. No entanto, todas as fiadas consecutivas tinham sobreposição lateral.

4. Capítulo IV – Recuperação Radiométrica

4.1. Razões para a Realização da Recuperação Radiométrica

O facto de as imagens registadas em rolo fotográfico se encontrarem em formato digital possibilitou a utilização de técnicas de processamento digital de imagem, que permitiram melhorar, consideravelmente, a radiometria destas. Actualmente, quando se realiza uma triangulação aérea, os pontos de passagem entre modelos estereoscópicos e os pontos de ligação entre fiadas são adquiridos automaticamente pelos programas utilizados, através de técnicas de processamento digital de imagem. Para que esta operação seja realizada com sucesso, é fundamental que as imagens pertencentes ao projecto apresentem características radiométricas semelhantes entre si.

O Matlab[®] foi o programa escolhido para o tratamento radiométrico das imagens seleccionadas. As razões que levaram a esta escolha foram a simplicidade desta linguagem de programação, quando comparada com outras linguagens; a facilidade em manipular matrizes e, conseqüentemente, em trabalhar com imagens; e, ainda, o facto de existirem muitas funções de processamento digital de imagem já programadas.

As imagens do voo RAF47 apresentam diversos problemas ao nível da radiometria. Como nem todas as imagens estão afectadas pelos mesmos problemas, o programa construído permite a escolha de três opções diferentes de processamento, estando cada uma destas vocacionada para a resolução de um problema distinto. A Figura 4.1 mostra o menu do programa desenvolvido, que permite escolher uma das três opções de processamento disponíveis: “Luminosidade Heterogénea”, “Luminosidade Variável” e “Grandes Descontinuidades”.

Uma vez que o número de imagens a trabalhar era elevado, o programa foi construído de forma a permitir a selecção de um conjunto de imagens e o processamento automático destas, não sendo necessária a intervenção do operador, para além da escolha das fotografias e da opção de processamento desejada. Desta forma, foi possível processar as imagens enquanto o operador realizava outras tarefas ou durante períodos fora do horário de trabalho.



Figura 4.1 – Menu do programa desenvolvido que permite seleccionar um dos três tipos de tratamento de imagens disponíveis.

4.2.Primeira Opção de Processamento – Luminosidade Heterogénea

4.2.1. Identificação do Primeiro Problema Radiométrico

Ao comparar as várias imagens pertencentes à zona de estudo, verificou-se que existe grande variabilidade de tons de cinzento, não só entre fotografias de fiadas diferentes, mas também em imagens consecutivas na mesma fiada. Na Figura 4.2 é visível um excerto de duas fiadas de fotografias utilizadas no projecto. Apesar de estas imagens corresponderem a zonas geograficamente próximas, uma vez que existe uma área comum às seis fotografias, as diferenças radiométricas entre elas são bastante notáveis.

O facto de as duas fiadas terem sido obtidas com rolos diferentes (as imagens da fiada superior foram registadas no rolo 73, enquanto as da fiada inferior pertencem ao rolo 38) indicou que as diferenças radiométricas podem ter sido originadas por características diferentes de cada um dos rolos ou pela possibilidade de as duas fiadas terem sido adquiridas em datas diferentes, ou seja, de estas terem sido obtidas em condições atmosféricas distintas. Contudo, verificou-se que também existem diferenças radiométricas entre fotografias consecutivas da mesma fiada, isto é, do mesmo rolo, as quais tiveram, obrigatoriamente, de ser obtidas na mesma data e com uma diferença temporal pequena.

A primeira opção de processamento disponível no programa elaborado tem como objectivo resolver o problema de imagens vizinhas não terem valores radiométricos semelhantes. O tratamento efectuado tem como base a análise do histograma de cada uma das imagens. O histograma é um gráfico que a cada nível de cinzento representado na imagem faz

corresponder o número de pixels da imagem que apresentam esse valor [Fisher *et al*, 2003a]. No caso deste projecto, como as imagens trabalhadas eram imagens de 8 bits, o histograma de qualquer uma destas apresentava 256 classes no eixo dos *xx*, com valores de 0 a 255.



Figura 4.2 – Mosaico construído com imagens antes do processamento (IGeoE).

4.2.2. Operações Realizadas sobre os Histogramas

A análise do histograma pode fornecer muitas informações sobre a qualidade radiométrica da imagem, sem ser necessária a visualização desta. Para além do aspecto gráfico, um histograma também pode ser definido através dos parâmetros estatísticos que o caracterizam. O valor médio do histograma é uma importante fonte de informação sobre a imagem. Em imagens de 8 bits, como as que foram trabalhadas neste projecto, os pixels da imagem podem apresentar qualquer valor de cinzento entre 0 e 255, em que o valor 0 corresponde à cor preta e o 255 à branca. Os números digitais intermédios apresentam tonalidades cinzentas, tornando-se estas mais claras com o aumento do número digital. O valor médio do histograma corresponde a uma média dos níveis de cinzento presentes na imagem, ponderada pelo número de pixels em que cada nível ocorre. Desta forma, se o valor

médio do histograma de uma imagem está mais próximo de 255 do que de 0, significa que a imagem apresenta uma tonalidade clara. Por outro lado, se o valor médio estiver mais próximo de 0, então a imagem tem uma tonalidade escura. Outra característica de um histograma que deve ser analisada é a quantidade de valores de cinzento representados na imagem. Muitas vezes apenas um pequeno conjunto de classes do histograma está ocupado, o que, na imagem, se traduz como a utilização de poucos níveis de cinzento, resultando uma imagem com pouco contraste. De acordo com McHugh (2005), “o contraste é uma medida da diferença de brilho entre zonas claras e escuras da imagem”. Histogramas correspondentes a imagens com pouco contraste, normalmente, são estreitos, têm poucas classes ocupadas e apresentam um desvio padrão baixo, indicando que não existe muita variabilidade nos números digitais utilizados. As imagens com elevado contraste têm um desvio padrão elevado, uma vez que, praticamente, todas as classes do histograma estão preenchidas, ou seja, existe uma grande dispersão de valores de cinzento em torno do valor médio.

As imagens aéreas apresentam, normalmente, pouco contraste, uma vez que não é frequente encontrar zonas geograficamente próximas (de forma a estarem representadas numa mesma fotografia) que mostrem números digitais baixos (por exemplo, o mar) e, também, valores altos (como zonas onde haja presença de neve). Portanto, na maioria dos casos, este tipo de imagens tem representados elementos semelhantes entre si, o que implica que os níveis de cinzento presentes nas imagens são relativamente próximos, resultando um baixo desvio padrão do histograma e uma imagem pouco contrastante [Mather, 1999].

4.2.3. Transformação dos Histogramas das Imagens do Voo RAF47

Segundo McHugh (2005), as alterações de contraste podem provocar melhorias consideráveis às imagens, em termos visuais, uma vez que melhoram a sua textura. No entanto, este tipo de transformações não produz resultados satisfatórios nas imagens do RAF47. Como se verá mais adiante, problemas de luminosidade dentro de cada uma das imagens tornam as operações que aumentem o contraste das imagens, não recomendáveis para tratar as fotografias em estudo. Apesar de se conseguirem algumas melhorias locais, pois com o aumento do contraste torna-se mais fácil a interpretação fotográfica em algumas zonas das imagens, globalmente o aspecto destas piora significativamente, principalmente junto das margens. Desta forma, acentua-se ainda mais a heterogeneidade radiométrica do mosaico fotográfico, o que é exactamente o oposto da finalidade deste tratamento radiométrico. Uma

vez que as alterações de contraste, ou seja, de desvio padrão do histograma, não conduzem aos resultados desejados, foi elaborada uma estratégia para homogeneizar as fotografias, que recorre à análise do valor médio do histograma de cada imagem.

A Figura 4.3 mostra os histogramas de duas imagens trabalhadas neste projecto, pertencentes a fiadas adjacentes, antes de serem tratadas. As imagens têm características muito diferentes entre si, não apenas ao nível do valor médio do histograma, mas também relativamente ao seu desvio padrão.

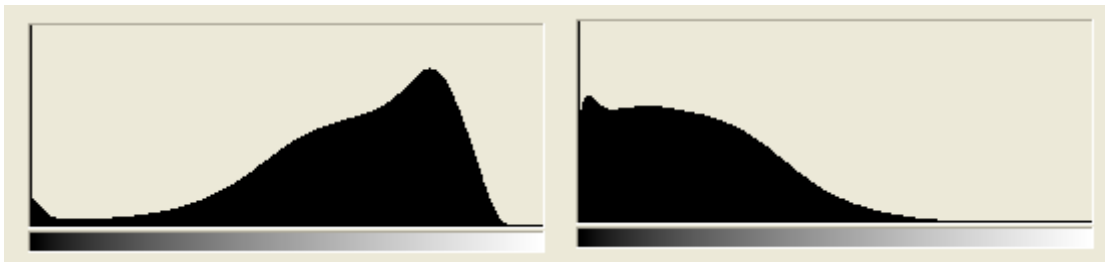


Figura 4.3 – Histogramas de imagens pertencentes a fiadas adjacentes, antes de serem tratadas.

No caso da imagem da esquerda, o valor médio do histograma é 157,40, enquanto o seu desvio padrão é de 50,84. Na imagem da direita, a média do histograma é 56,39 e o seu desvio padrão apresenta o valor 39,41. Sem ver as imagens é possível concluir, através da análise destes valores e da forma dos gráficos expostos, que a imagem da esquerda é mais clara que a da direita e apresenta maior contraste, uma vez que o valor médio e o desvio padrão da primeira são superiores aos da segunda.

Para aproximar a radiometria das várias imagens, o programa altera os números digitais de cada pixel para que os valores médios dos histogramas de todas as imagens passem a ser próximos de um único valor. Esta opção de processamento não foi utilizada apenas para tornar as imagens originais semelhantes radiometricamente, mas também para melhorar imagens que ficaram demasiado escuras ou demasiado claras depois de terem sido processadas com uma das outras opções de tratamento que podem ser seleccionadas.

O nível de cinzento escolhido para passar a ser o valor médio do histograma de todas as imagens, após o processamento, foi noventa. Para seleccionar este valor, foram observadas várias imagens, pertencentes a fiadas diferentes, e verificou-se que este valor era o mais adequado, uma vez que, nos testes realizados, as imagens não ficavam demasiado escuras nem demasiado claras, tornando-se mais legíveis que as originais. Se o programa for utilizado

para tratar outro voo que não seja o RAF47, provavelmente será necessário determinar outro valor que se adapte melhor às imagens a processar.

O programa começa por determinar a média do histograma de cada uma das imagens seleccionadas através da fórmula:

$$\text{Valor Médio} = \frac{\sum_{i=0}^{255} (i \times n(i))}{N}$$

onde i é cada um dos níveis de cinzento, os quais variam entre 0 e 255, $n(i)$ é o número de pixels da imagem que apresentam o nível de cinzento i e N é o número total de pixels da imagem. Os valores de frequência de cada um dos níveis de cinzento foram obtidos através de uma função do Matlab[®].

De seguida, é calculada a diferença entre este valor e o valor escolhido para ser a média final. A imagem que está a ser alvo do tratamento é percorrida, pixel a pixel, e a cada um destes é subtraída a diferença anterior. Não é necessário diferenciar o processamento para imagens claras e para imagens escuras. Quando a imagem é demasiado clara, a média do histograma original é superior à média final (noventa), logo a diferença entre as duas médias é um valor positivo. Por isso, quando este resultado é subtraído à imagem original, os números digitais baixam e esta torna-se mais escura. No caso em que a imagem é demasiado escura, como a diferença entre as duas médias é negativa, ao ser subtraída da imagem original, os números digitais ficam maiores, resultando uma imagem mais clara. Dado que a todos os pixels da imagem é subtraído o mesmo valor, a imagem completa vai ficar uniformemente mais clara ou mais escura, consoante a situação original. A relação entre valores de cinzento de pixels vizinhos não é modificada.

Esta opção de processamento demorou cerca de um minuto a tratar cada uma das imagens do voo RAF47, ou seja, foi possível processar todas as imagens utilizadas na realização do projecto em aproximadamente três horas.

A Figura 4.4 apresenta o mosaico formado pelo mesmo conjunto de imagens presentes no mosaico da Figura 4.2. É claramente visível que as imagens da fiada de cima tornaram-se mais claras, enquanto as da fiada de baixo passaram a apresentar uma tonalidade mais escura, tal como era o objectivo do algoritmo. Desta forma, os níveis de cinzento das imagens ficaram muito mais próximos entre si.

Os histogramas da Figura 4.5 correspondem às imagens cujos histogramas estão representados na Figura 4.3, depois de estas terem sido tratadas com a opção “Luminosidade Heterogénea”.



Figura 4.4 – Mosaico construído com imagens processadas com a opção “Luminosidade Heterogénea” (IGeoE).



Figura 4.5 - Histogramas de imagens pertencentes a fiadas adjacentes, depois de serem tratadas com a opção “Luminosidade Heterogénea”.

Os valores médios dos histogramas de ambas as imagens passaram a estar próximos de noventa (para a imagem da esquerda 91,13 e para a da direita 90,39), razão pela qual as imagens ficaram mais semelhantes radiometricamente. O desvio padrão da imagem da direita não sofreu qualquer alteração, isto é, não houve alteração do contraste desta, pois as diferenças radiométricas entre pixels vizinhos mantiveram-se iguais. No caso da imagem da

esquerda, como o histograma sofreu uma translação para a esquerda e existiam, na imagem original, pixels com números digitais próximos de zero, todos os pixels pertencentes a essas classes, depois do tratamento, ficaram com o valor de cinzento 0. Esta alteração traduziu-se numa pequena diminuição do desvio padrão da imagem para 44,07.

Apesar de o conjunto de imagens pertencentes ao bloco considerado ficar radiometricamente mais homogéneo depois de ser processado com a opção “Luminosidade Heterogénea”, não significa que os elementos comuns representados em fotografias consecutivas apresentem os mesmos níveis de cinzento. Por exemplo, se uma imagem tiver um conjunto grande de pixels muito claros ou muito escuros que não pertençam à imagem adjacente, como o valor da média é influenciado por estes elementos (ficando mais afastada do valor da média final pretendida), a quantidade de luminosidade que é adicionada ou subtraída à primeira imagem é maior que a correspondente à segunda. Desta forma, elementos representados em ambas as imagens, mesmo que nas fotografias originais apresentem valores de cinzento próximos, depois do processamento possuem números digitais muito distintos, apesar das médias dos histogramas das duas imagens serem muito próximas.

Uma vez que este tipo de processamento não provoca qualquer alteração na relação entre valores de cinzento de pixels vizinhos, as imagens do RAF47 continuam a apresentar problemas radiométricos que podem dificultar a realização de uma triangulação automática. Por esta razão, foram construídos outros dois algoritmos, como se expõe nos pontos seguintes.

4.3.Segunda Opção de Processamento – Luminosidade Variável

4.3.1. Identificação do Segundo Problema Radiométrico

Para além das diferenças entre imagens, as fotografias do RAF47 têm, ainda, o problema adicional de apresentarem variações radiométricas dentro da própria imagem. Os casos mais problemáticos traduzem-se na existência de faixas verticais e no facto de muitas fotografias terem os cantos demasiado escuros.

A primeira situação poderá causar problemas na triangulação automática, uma vez que imagens consecutivas podem ou não ser afectadas pelas faixas, e mesmo que o sejam, nunca são afectadas de forma igual, nos mesmos sítios, dificultando, assim, a procura de pontos homólogos.

A Figura 4.6 mostra, a título de exemplo, uma das várias fotografias que apresentam faixas verticais. Este fenómeno acontece, com maior frequência, em imagens onde existe uma grande área coberta por água. Este tipo de imagens tem tendência a ser o que possui mais problemas, uma vez que o reflexo do Sol na água causa muitas manchas em toda a imagem.



Figura 4.6 – Fotografia aérea afectada pelo reflexo do Sol na água e por faixas verticais (IGeoE).



Figura 4.7 – Fotografia aérea com os cantos escurecidos (IGeoE).

Quase todas as fotografias utilizadas no projecto apresentam os cantos muito escuros (Figura 4.7), não permitindo a visualização dos elementos representados. Este problema indica que o tempo de exposição quando as fotos foram tiradas foi demasiado pequeno. Mais

uma vez, esta situação poderá ser problemática para a triangulação automática das imagens, pois pormenores representados numa das fotografias, não são visíveis na seguinte. Esta situação dificultou a já complicada tarefa de medição dos Pontos Fotogramétricos, sempre que um destes se encontrava num dos cantos de pelo menos uma das imagens.

Para a resolução destas situações foi construída uma outra opção de processamento no programa desenvolvido. Estas variações radiométricas foram encaradas como variações de luminosidade do fundo da imagem. Se o fundo de todas as imagens passar a apresentar uma luminosidade homogénea, então os efeitos problemáticos presentes nos exemplos anteriores deixam de se verificar. A ideia principal para a resolução deste problema foi a criação de uma imagem auxiliar que representasse a luminosidade do fundo de cada fotografia e, que ao ser subtraída à imagem original, eliminasse estes efeitos, construindo, assim, uma imagem com um fundo homogéneo.

4.3.2. Abertura Morfológica de Imagens de Cinzentos

A qualidade da imagem auxiliar que contém os efeitos de luminosidade é determinante para a uniformização radiométrica da respectiva fotografia. Pretende-se que esta traduza fielmente todas as variações de luminosidade presentes na imagem original, de forma a apresentar os níveis de cinzento mais elevados nas zonas onde há excesso de luminosidade e valores muito próximos de 0 nas zonas cujos valores radiométricos se quer manter, para que quando é feita a subtracção, estes se mantenham inalterados. Desta forma, é possível obter uma imagem com um fundo homogéneo em termos de luminosidade.

A imagem auxiliar que contém os efeitos de luminosidade pode ser obtida a partir de uma simplificação da imagem original. Uma das técnicas de processamento digital de imagem mais utilizada para este fim é a abertura morfológica de imagens de cinzentos [The MathWorks™, 2008].

A abertura é uma operação morfológica que consiste na execução de uma dilatação após uma erosão, sendo as duas operações morfológicas realizadas com o mesmo elemento estruturante.

Para realizar uma operação morfológica é necessário definir um elemento estruturante. Um elemento estruturante é um conjunto de pixeis, cada um dos quais é definido pelas suas coordenadas relativas a uma determinada origem e por um valor de cinzento. Em imagens binárias estes valores normalmente são 0 e 1, enquanto em imagens pancromáticas, os pixeis

pertencentes ao elemento estruturante podem apresentar qualquer valor de cinzento. Normalmente, os elementos estruturantes são representados como uma pequena imagem numa grelha rectangular. Os elementos estruturantes podem apresentar diversas formas (rectangular, disco, entre outras) e a sua origem também pode variar. O efeito que uma determinada operação morfológica tem sobre uma imagem depende das características do elemento estruturante, sendo atingidos resultados distintos para diferentes elementos. Durante a realização da operação morfológica pretendida, o elemento estruturante percorre toda a imagem, comparando os seus valores de cinzento com os valores dos pixels correspondentes na imagem a transformar. Dependendo da operação que está a ser executada, é determinado um valor de cinzento a partir dos valores anteriores e este é atribuído ao pixel da imagem correspondente à origem do elemento estruturante [Fisher *et al*, 2003c].

A erosão de imagens de cinzento, representada por $E_G(A,B)$, é a primeira operação a ser realizada quando se faz a abertura e é definida por: $E_G(A,B)=\min_{[j,k] \in B} \{a[m-j,n-k]-b[j,k]\}$, onde A é a imagem a processar, B é o elemento estruturante, m e n são as coordenadas do pixel da imagem a que vai ser atribuído um novo valor de cinzento, j e k são as coordenadas dos pixels do elemento estruturante [Quantitative Imaging Group, 2009b]. Para a realização da erosão, o elemento estruturante percorre toda a imagem a transformar, de forma a que a sua origem passe por todos os pixels da imagem. Em cada passo do algoritmo, é calculada a diferença entre os valores de cinzento de um pixel da imagem e do pixel correspondente do elemento estruturante. De todos os números determinados desta forma, é escolhido o menor de todos, o qual é atribuído ao pixel da imagem original que corresponde à origem do elemento estruturante. Depois desta atribuição, o elemento estruturante desloca-se sobre a imagem de forma a que a sua origem passe a localizar-se sobre o pixel vizinho ao anterior e o processo é repetido.

O efeito da aplicação da erosão sobre uma imagem pancromática revela-se na diminuição da dimensão de zonas com números digitais elevados e no aumento do tamanho das zonas de números digitais baixos, resultando uma imagem globalmente mais escura. As zonas da imagem onde a luminosidade é aproximadamente homogénea, não sofrem alterações significativas após a realização da erosão, mas verificam-se grandes mudanças nas zonas que, na imagem original, apresentavam variações de luminosidade [Fisher *et al*, 2003d].

A dilatação é a operação morfológica que se realiza após a erosão quando se pretende realizar a abertura de uma imagem. A dilatação de imagens de cinzentos ($D_G(A,B)$) é definida por: $D_G(A,B)=\max_{[j,k] \in B} \{a[m-j,n-k]+b[j,k]\}$, onde A é a imagem a processar, B é o elemento estruturante, m e n são as coordenadas do pixel da imagem a que vai ser atribuído um novo

valor de cinzento, j e k são as coordenadas dos pixels do elemento estruturante [Quantitative Imaging Group, 2009b]. O procedimento realizado para executar a dilatação da imagem é análogo ao da erosão, mas neste caso, é calculada a soma dos valores de cinzento dos pixels da imagem e do elemento estruturante, em vez da subtracção, e o valor de cinzento atribuído ao pixel da imagem correspondente à origem do elemento estruturante é o máximo dos valores obtidos.

Ao contrário da erosão, a dilatação torna a imagem mais clara, uma vez que aumenta o tamanho das zonas com números digitais elevados e diminui as áreas com números digitais baixos. No entanto, à semelhança da técnica anterior, as zonas onde se verificam as maiores alterações continuam a ser aquelas que na imagem original apresentavam maiores variações de luminosidade, enquanto as zonas de luminosidade aproximadamente constante não sofrem grandes alterações [Fisher *et al*, 2003e].

Frequentemente, as definições acima apresentadas para a erosão e para a dilatação podem ser simplificadas. Esta simplificação pode ser conseguida através da utilização de um elemento estruturante em que todos os pixels apresentam o valor 0. Desta forma, pode-se substituir, em ambas as fórmulas apresentadas, $b[j,k]$ por 0. Desta substituição resulta $E_G(A,B)=\min_B(A)$ e $D_G(A,B)=\max_B(A)$, ou seja, o valor a atribuir ao pixel da imagem que corresponde à origem do elemento estruturante é o valor de cinzento mínimo (para a erosão) da zona da imagem original que é abrangida pelo elemento estruturante, enquanto no caso da dilatação, o valor a atribuir é o valor de cinzento máximo. Feita esta simplificação, a abertura da imagem ($O_G(A,B)$) pode ser definida apenas por $O_G(A,B)=\max_B(\min_B(A))$ [Quantitative Imaging Group, 2009b].

Em imagens de cinzentos, a abertura morfológica é, muitas vezes, utilizada para remover ruído. Contudo, esta tarefa apenas produz resultados aceitáveis se o ruído a eliminar for constituído por pixels claros. No caso de os pontos a apagar apresentarem cor escura, após a aplicação da abertura, o ruído tem tendência a aumentar. A característica da abertura que tem mais relevância para o tratamento das imagens do presente projecto é a capacidade que este operador apresenta para preservar determinados padrões de intensidade e atenuar outros. Desta forma, os elementos de uma imagem cujas dimensões são inferiores às do elemento estruturante, depois da realização da abertura, apresentam menor intensidade. Elementos maiores que o elemento estruturante não são alterados [Fisher *et al*, 2003b]. Estas propriedades da operação tornam-na adequada ao objectivo do algoritmo desenvolvido. A abertura morfológica tem a capacidade de detectar as diferenças de luminosidade presentes nas imagens, construindo uma nova imagem que contém, apenas, os efeitos de luz que se

pretende eliminar da imagem original. A forma e o tamanho do elemento estruturante escolhido são vitais para o sucesso da operação. As dimensões deste devem ser superiores às dos pormenores representados na imagem, para que, na imagem auxiliar, estes não estejam representados e inferiores às dos efeitos de luminosidade a fim de os manter inalterados. Desta forma, quando a imagem resultante da abertura é subtraída à imagem original, os efeitos de luminosidade desaparecem e os pormenores permanecem inalterados.

De todas as formas que o Matlab[®] disponibiliza para a definição de elementos estruturantes, foi escolhida a forma de disco. Como todas as imagens do projecto têm a mesma escala, foi suficiente utilizar um único valor para definir o diâmetro do elemento estruturante para todas as imagens, ao invés de determinar um valor diferente para cada uma, o que para ser concretizado com sucesso, aumentava a complexidade do algoritmo e não conduzia, obrigatoriamente, a uma melhoria significativa do resultado. Foram experimentados diversos valores, todavia, as tentativas realizadas com imagens de teste (fracções das imagens originais com, aproximadamente, um centésimo da área da imagem completa) indicaram que, utilizando como raio o menor valor que conduziu a resultados aceitáveis, o tempo de processamento de uma imagem completa seria aproximadamente oito horas, ou seja, seriam necessárias mais de treze semanas para processar todas as imagens do projecto (considerando que o processamento seria ininterrupto desde as nove horas de segunda-feira até às dezassete horas de sexta-feira de cada semana). Devido ao extenso intervalo de tempo que seria necessário para processar todas as imagens, a utilização da abertura como forma de construir uma imagem de luminosidade foi, temporariamente, abandonada.

4.3.3. Luminosidade de Imagens Auxiliares

Para construir a imagem de luminosidade foi, então, adoptada uma nova estratégia. A imagem principal foi dividida num número fixo de imagens mais pequenas. Para representar os diferentes efeitos de luminosidade, foi calculado, para cada imagem auxiliar, o respectivo valor médio do histograma, o qual foi atribuído a todos os pixels da imagem auxiliar. Desta forma, a cada uma destas foi atribuído um valor relacionado com a luminosidade presente na área considerada, como se pode observar na Figura 4.8.



Figura 4.8 – Fracção de imagem de luminosidade com diferentes valores de cinzento para cada imagem auxiliar.

Quanto maior fosse a luminosidade presente na zona abrangida por uma determinada imagem auxiliar, maior seria o número digital atribuído aos pixels desta. Para garantir que a imagem final apresentava valores de cinzento aceitáveis, isto é, nem demasiado claros, nem demasiado escuros, foi subtraído o valor 127 a todos os pixels da imagem resultante (a qual era proveniente da junção de todas as imagens auxiliares, depois de ter sido atribuído o valor médio do respectivo histograma a cada uma). O valor escolhido para ser subtraído aos valores de cinzento da imagem foi 127, pois este é o menor inteiro mais próximo do ponto médio do intervalo de valores de cinzento disponíveis [0, 255]. Após a execução deste procedimento, foi obtida uma imagem com valores positivos, quando na imagem original os níveis de cinzento estavam acima de 127 e negativos no caso contrário. O objectivo da construção desta matriz auxiliar foi, novamente, subtraí-la à imagem original e, assim, diminuir a luminosidade nas zonas claras, pois era subtraído um valor positivo, e aumentá-la nas zonas escuras, onde eram subtraídos valores negativos. Contudo, a imagem que foi subtraída à imagem original era uma junção de imagens auxiliares adjacentes, sem qualquer zona em comum, cada uma com um nível de cinzento diferente. Logo, esta imagem apresentava descontinuidades nas zonas de fronteira entre as imagens auxiliares. Para atenuar os efeitos destas descontinuidades, foi utilizado um filtro média que suavizou estas transições. Quando o resultado foi subtraído à imagem original, esta já não ficou afectada pelas descontinuidades. As particularidades do filtro utilizado para suavizar a imagem serão descritas mais adiante, no ponto 4.3 deste texto.

Este método de processamento conduziu a resultados satisfatórios com imagens de teste com cerca de um centésimo das dimensões das imagens originais. Contudo, quando começaram a ser executados testes com as imagens completas, começaram a ocorrer erros de memória. As imagens digitalizadas do voo RAF47 ocupam bastante memória (aproximadamente 115 Mb cada uma). São imagens que contêm cerca de 10500 por 10500 pixels. No decorrer do processamento do algoritmo acima exposto, existia um momento em que estavam em utilização simultânea duas imagens com estas dimensões: a imagem original, a partir da qual eram construídas as imagens auxiliares das quais se calculava o valor médio do histograma, e a imagem da luminosidade, na qual eram aglomeradas as imagens auxiliares já apresentando o valor médio do histograma correspondente às suas equivalentes na imagem original, e na qual era utilizado o filtro média. Esta utilização abusiva da memória disponível obrigou a que este método de processamento fosse, também, abandonado, uma vez que não foi encontrada uma solução para esta situação.

4.3.4. Optimização do Algoritmo da Abertura Morfológica

Uma das técnicas mais eficazes para melhorar a utilização da memória em processamento digital de imagem é a divisão de cada imagem em imagens mais pequenas e a aplicação das funções nessas imagens menores em vez de serem aplicadas na imagem completa [The MathWorks™, 2008]. A terceira tentativa de construção de um programa para tratar os efeitos de luminosidade variável das fotografias aéreas consistiu na fusão das duas tentativas expostas anteriormente.

A imagem original foi dividida em 121 imagens auxiliares, mas poderia ter sido utilizado qualquer outro número, desde que não fosse demasiado pequeno, uma vez que daria origem a imagens auxiliares muito grandes, originando os mesmos problemas de utilização de memória que a versão anterior. Não há qualquer restrição quanto ao número máximo de imagens auxiliares a utilizar.

Este novo algoritmo recorre, mais uma vez, à abertura morfológica para simplificar a imagem. Ao invés da metodologia anterior, neste caso apenas uma imagem está aberta durante quase todo o processamento. A imagem original é aberta no início do programa e, a partir desta, é possível aceder a cada uma das imagens auxiliares, nas quais, numa de cada vez, é feita a abertura. Depois de realizada a operação morfológica, a imagem auxiliar em que esta é executada é gravada sobre a imagem original. Quando este passo fica concluído, é

accedida a imagem auxiliar seguinte, na qual o processo é repetido, até ter sido feito para todas as imagens auxiliares. Desta forma, a única imagem de dimensões elevadas que está em utilização é a imagem original, uma vez que as imagens auxiliares são muito menores e só está aberta uma de cada vez. Depois de concluído este processo, a imagem original transformou-se numa imagem mais simples, contendo todos os efeitos de luminosidade. Para além destes elementos, esta imagem contém, ainda, as discontinuidades provenientes da junção das imagens auxiliares adjacentes, as quais são visíveis na Figura 4.9.

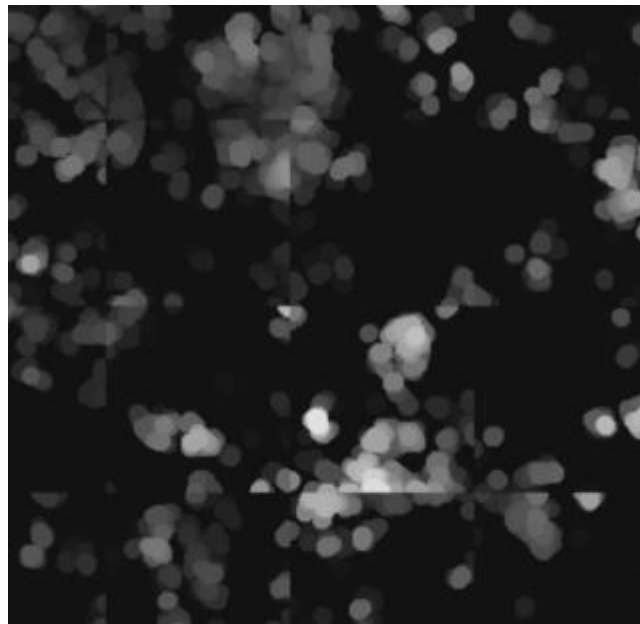


Figura 4.9 – Imagem teste onde são visíveis as discontinuidades entre as imagens auxiliares.

Para eliminar estes efeitos indesejados é necessário percorrer a imagem com um filtro média. Dado que também este é uma forma de simplificação da imagem, quando se realiza a abertura não há necessidade de processar a imagem com um elemento estruturante demasiado grande. Este procedimento elimina o maior problema da primeira versão do algoritmo, que recorria a um elemento estruturante demasiado grande para produzir resultados aceitáveis. Desta forma, a divisão da imagem em imagens menores torna o processamento mais rápido e a utilização de um elemento estruturante mais pequeno contribui ainda mais para este facto. O elemento estruturante escolhido para executar a abertura da imagem foi um disco com raio de 50 pixels. As dimensões reduzidas deste tornam a imagem muito “rugosa”, o que deixa marcas no resultado final. No entanto, este problema é atenuado aquando da realização da filtragem da imagem, que, assim, soluciona dois problemas de uma vez só: elimina as

descontinuidades entre as imagens auxiliares e aumenta a simplificação da imagem. Esta posterior realização da filtragem é a razão pela qual a abertura pode ser realizada com um elemento estruturante menor.

O resultado de todo este processo é uma nova imagem onde estão representados os pontos em que a luminosidade é exagerada. Neste ponto do programa, a imagem original é lida de novo, para uma nova variável e a imagem simplificada é subtraída a esta, criando uma nova imagem semelhante à original, apenas com a diferença de ser mais escura nos pontos em que a imagem original mostrava excesso de luminosidade, apresentando, assim, uma luminosidade do fundo uniforme. Ao contrário do que acontecia com a tentativa anterior, nesta versão as duas imagens de grandes dimensões só estavam abertas para criar a imagem diferença (que é um processo relativamente simples).

Com o aumento da velocidade de processamento da abertura, a quase totalidade do tempo necessário para processar cada uma das imagens é devido à filtragem da imagem. Para que a “rugosidade” causada pela abertura seja atenuada, foi escolhida uma janela para filtrar a imagem com forma de disco e com um raio ligeiramente superior ao do elemento estruturante da abertura. O valor escolhido foi 75 pixels. Para uma imagem completa, o processo acima descrito demorou aproximadamente três horas a processar cada imagem. O tempo total necessário para processar todas as imagens do projecto foi de sete semanas.

Apesar de a divisão das imagens de grandes dimensões em imagens mais pequenas tornar o processamento mais rápido, esta técnica não pode ser utilizada com a filtragem. Quando se executa um filtro média, os bordos da imagem não são processados da mesma forma que o resto da imagem, como está explicado no ponto 4.3 do presente texto; logo ao processar as imagens auxiliares individualmente, quando estas são reunidas numa só, são visíveis os efeitos relacionados com os bordos. A Figura 4.10 mostra uma pequena zona de uma imagem, onde foi aplicado o filtro média a cada uma das imagens auxiliares, de forma independente, com o propósito de acelerar o processo. A figura mostra claramente o efeito que o filtro média provoca nas margens das imagens. Uma vez que este efeito iria permanecer visível na imagem final, quando a imagem de luminosidade fosse subtraída da original, este método não pôde ser utilizado, não tendo sido possível, desta forma, otimizar o tempo de processamento das imagens.



Figura 4.10 – Efeito da utilização do filtro média sobre imagens auxiliares e sua posterior união numa imagem única.

A conjugação dos resultados obtidos com a abertura e com a filtragem permitem a aquisição de uma versão suficientemente simplificada da imagem original, para, ao ser subtraída a esta, não eliminar os pormenores representados.

Nas zonas onde existe uma elevada densidade de pormenores representados, como por exemplo, nas áreas urbanas, os resultados obtidos com o algoritmo descrito são aceitáveis, uma vez que os valores de cinzento que resultam da abertura correspondem à luminosidade do fundo e, quando subtraídos aos pormenores, estes mantêm as diferenças radiométricas já existentes: objectos mais claros na imagem original continuam a ser mais claros na imagem tratada. Contudo, em áreas de luminosidade homogénea, principalmente em áreas com números digitais elevados, por exemplo, áreas de cultivo ou praia, o resultado da abertura adquire níveis de cinzento muito próximos dos da imagem original. Isto acontece porque estes elementos têm dimensões superiores às do elemento estruturante e, por isso, a sua luminosidade é mantida quando é feita a abertura e o filtro apenas suaviza os efeitos de luminosidade detectados pela abertura. Como consequência, quando é feita a subtracção, a área em questão fica muito escura, podendo ficar radiometricamente muito próxima de uma área vizinha que, originalmente, era mais escura. Esta segunda área, uma vez que lhe são subtraídos números digitais mais pequenos, fica quase inalterada. Desta forma, duas áreas adjacentes, que na imagem original apresentariam níveis de cinzento bastante distintos, na imagem tratada poderão estar radiometricamente semelhantes. Como a imagem fica, globalmente, mais escura, verifica-se uma perda generalizada de contraste. A Figura 4.11 mostra a mesma zona geográfica, na mesma imagem, antes e depois de esta ter sido processada com o algoritmo. É bastante visível o escurecimento da segunda imagem e a maior

proximidade radiométrica entre campos de cultivo adjacentes. No entanto, todos os pormenores representados na imagem original continuam a ser perceptíveis na imagem tratada.

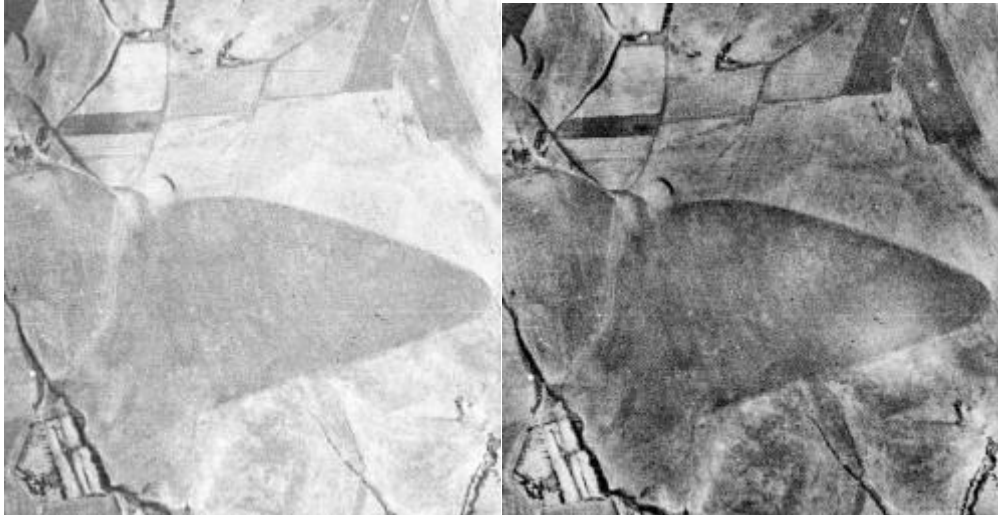


Figura 4.11 – Comparação de pormenores de uma imagem antes (esquerda) e depois (direita) de processada com o segundo algoritmo (IGeoE).

Apesar de o resultado atingido com o algoritmo ainda apresentar alguns problemas, este processamento permitiu transformar as imagens iniciais, com muitos problemas radiométricos, em imagens com uma luminosidade homogénea. A Figura 4.12 mostra as superfícies de luminosidade da mesma imagem, antes e depois do processamento. Em ambas as situações foi utilizada a mesma escala de cores, em que o azul-escuro corresponde aos valores mais baixos de intensidade representados na imagem e o vermelho escuro aos mais elevados. A imagem foi obtida com o programa Matlab[®].

Na imagem da esquerda é visível uma grande variação de intensidade na imagem, sendo de destacar os cantos que se apresentam muito escuros e o centro da imagem que se encontra demasiado claro. Praticamente todas as imagens trabalhadas no projecto apresentam superfícies de luminosidade semelhantes à apresentada. Na segunda imagem, as cores representadas já são bastante mais próximas entre si, o que significa que a luminosidade da imagem está muito mais homogénea. No entanto, a predominância dos tons azuis indica que a imagem está muito escura. O ideal seria as cores presentes no esquema estarem mais próximas do azul claro, amarelo e verde, que correspondem ao centro do intervalo [0, 255]. Esta tendência para apresentar tonalidades escuras deve-se, principalmente, ao facto de a

imagem utilizada ter várias zonas de cultivo representadas. Como já foi dito, estas áreas, dado que têm tonalidades claras e as suas dimensões são superiores às do elemento estruturante, ficam quase inalteradas quando se realiza a abertura, o que implica o seu escurecimento em demasia quando a imagem auxiliar é subtraída à original. Verifica-se, ainda, na imagem da direita, que os cantos não sofreram qualquer alteração em relação à imagem da esquerda, uma vez que apresentam a mesma cor. Isto é devido ao facto de a abertura apenas detectar as zonas que possuem excesso de luminosidade, não sendo possível, com esta técnica, recuperar as zonas que se encontram demasiado escuras.

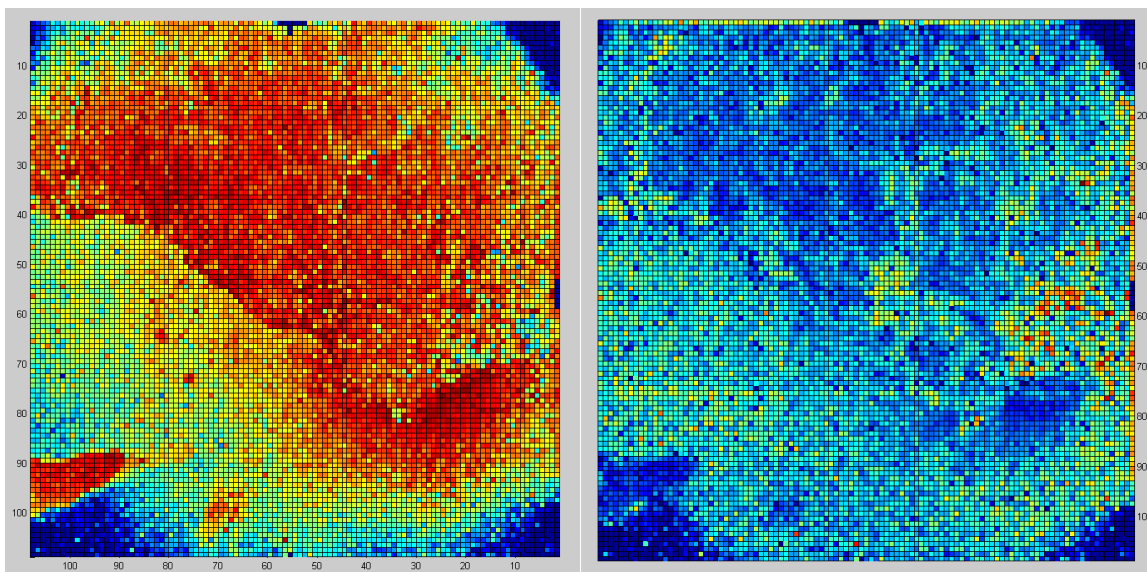


Figura 4.12 – Comparação de superfícies de luminosidade antes (esquerda) e depois (direita) do processamento da imagem com o segundo algoritmo.

A grande finalidade do tratamento radiométrico efectuado às imagens é tornar possível a detecção automática de pontos homólogos entre as imagens aquando da realização da recuperação geométrica destas. Para que este processo seja concretizado com sucesso, é fundamental que as imagens sejam semelhantes entre si. A comparação dos histogramas de imagens adjacentes antes e depois do processamento, mostra que imagens que antes possuíam características completamente diferentes (média e desvio padrão), depois de sujeitas ao algoritmo, passaram a estar bastante próximas. Este facto aumenta a probabilidade de sucesso do algoritmo de triangulação automática, cuja utilização será descrita mais adiante.

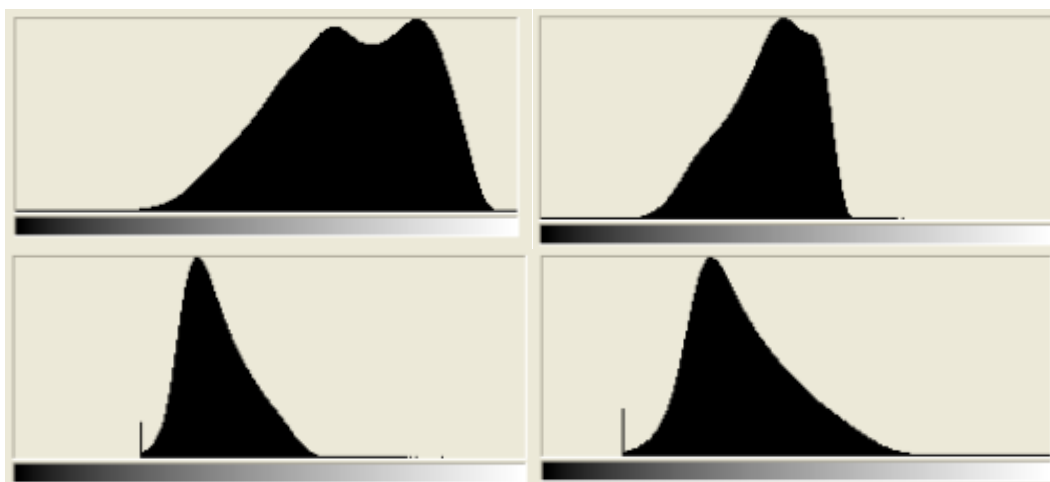


Figura 4.13 – Histogramas de duas imagens consecutivas (esquerda e direita) antes (em cima) e depois (em baixo) de processadas com o segundo algoritmo.

Na Figura 4.13, em cima, podem ser observados os histogramas de duas imagens consecutivas pertencentes à mesma fiada. As diferenças entre estes histogramas são bastante significativas, tanto ao nível do valor médio como do desvio padrão, indicando que as imagens correspondentes apresentam características radiométricas muito diferentes. Como se pode ver em baixo, depois de as imagens terem sido processadas, os histogramas destas tornaram-se muito mais semelhantes. Apesar de ainda serem visíveis algumas diferenças no que diz respeito ao valor médio e ao desvio padrão, estas são muito menos significativas do que antes do processamento. Com o aumento de semelhança entre os histogramas das imagens, o qual corresponde a um aumento de semelhança radiométrica entre estas, a probabilidade de realização de uma triangulação automática com sucesso aumenta.

4.4. Terceira Opção de Processamento – Grandes Descontinuidades

4.4.1. Identificação do Terceiro Problema Radiométrico

O caso particular de uma das imagens utilizadas no projecto levou à construção de uma terceira opção de processamento. Esta fotografia apresenta uma grande descontinuidade a nível radiométrico, estando, praticamente, dividida em duas partes. A parte da esquerda tem um aspecto semelhante ao das imagens vizinhas, mas a parte direita está muito escura, sendo

quase impossível a visualização dos pormenores representados, como se pode observar na Figura 4.14.



Figura 4.14 – Imagem com uma grande descontinuidade radiométrica, antes do processamento (IGeoE).

A utilização da técnica de processamento anteriormente descrita não resolve o problema desta imagem. Para além da recuperação da parte esquerda da imagem, na qual poderia ser utilizado o método anterior, o grande problema desta fotografia é a recuperação da parte direita. A abertura morfológica, que é o operador utilizado no segundo tipo de tratamento, apenas permite a subtração de luz em zonas onde esta exista em demasia, não permitindo a sua adição em zonas onde esta não existe. Para tratar esta imagem foi necessário procurar uma forma de a simplificar considerando tanto a parte clara como a escura. A solução encontrada foi a utilização do filtro média.

4.4.2. Filtro Média

Uma imagem é constituída por duas componentes: uma de baixas frequências e outra de altas frequências. A primeira componente consiste num padrão, aproximadamente constante, que forma o fundo da imagem, enquanto a segunda é formada pelos diversos

pormenores representados. Estas duas componentes podem ser individualizadas através da utilização de filtros passa-baixa ou passa-alta, respectivamente. Uma vez que o objectivo do programa construído para resolver os problemas radiométricos das imagens é obter uma imagem que traduza a luminosidade do fundo da imagem, pode ser utilizado um filtro passa-baixa para obter esta componente. Quando esta imagem auxiliar é subtraída à imagem original, o resultado obtido consiste apenas na componente de altas frequências da imagem [Mather, 1999].

Dos vários tipos de filtro passa-baixa existentes, o escolhido para tratar as imagens do RAF47 foi o filtro média, cujo objectivo é diminuir a variabilidade global da imagem e baixar o contraste desta. Os pixels que apresentam valores mais afastados da média dos pixels vizinhos passam a estar radiometricamente mais próximos destes [Mather, 1999].

Para efectuar a filtragem da imagem através de um filtro média é necessário definir uma janela para percorrer toda a imagem a transformar, a qual permite obter o valor de cinzento a atribuir ao pixel da imagem original correspondente ao pixel central da janela. Quanto maior for o tamanho da janela do filtro, maior é o efeito da suavização. Esta janela pode ter dimensões diferentes para as linhas e para as colunas, mas tem de, obrigatoriamente, ser constituída por um número ímpar de pixels, de forma a existir um pixel central. Este pixel central percorre quase todos os pixels da imagem original. O facto de este ponto se situar no centro da janela e de os únicos pontos alterados serem os que lhe correspondem, faz com que, na imagem resultante, haja uma faixa a toda a volta da imagem que não é filtrada. A dimensão desta faixa depende do número de pixels existentes antes e depois do pixel central (tanto nas linhas como nas colunas). O início da filtragem dá-se no canto superior esquerdo da imagem, em que a janela ocupa uma posição tal que todos os pixels que a constituem estão contidos na imagem a transformar. O valor a atribuir ao pixel correspondente ao pixel central da janela é o valor médio de todos os pixels da imagem que são abrangidos pela janela do filtro, em cada passo deste. Após a atribuição deste valor, a janela desloca-se um pixel para a direita sobre a imagem e o processo volta a ser repetido até a janela atingir o canto inferior direito da imagem, onde, novamente, o pixel central não volta a atingir a margem da imagem. Esta margem de pixels que não foi filtrada, dependendo dos algoritmos utilizados, pode manter os valores de cinzento presentes na imagem original ou então todos os seus pixels serão preenchidos com o número digital 0 [Mather, 1999].

4.4.3. Aplicação do Filtro Média Às Imagens do Voo RAF47

Foi criada uma janela com forma de disco e com um raio de 250 pixels que filtrou a totalidade da imagem. Após a filtragem, a imagem resultante apresentava valores de cinzento claros na zona da esquerda e valores escuros na da direita, conforme é visível na Figura 4.15.

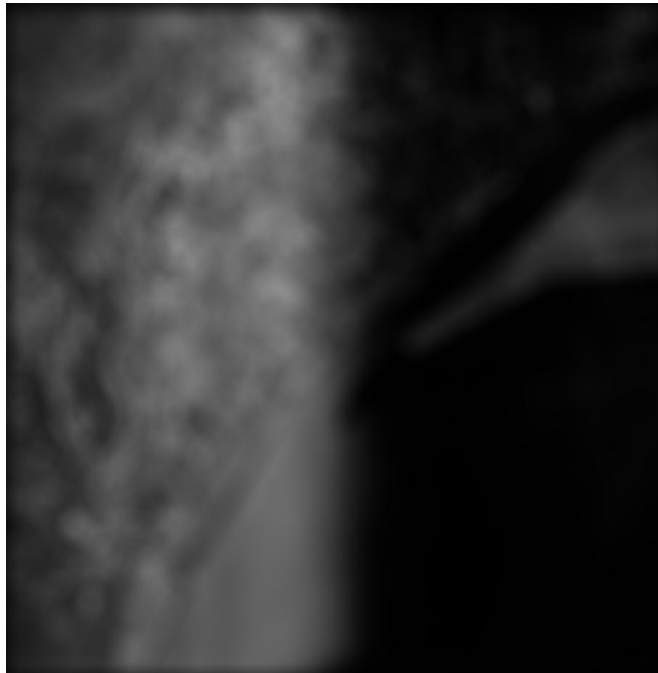


Figura 4.15 – Imagem com grandes discontinuidades radiométricas depois da aplicação do filtro média.

Se a imagem anterior fosse subtraída directamente à imagem original, seria obtida uma imagem completamente escura, pois a parte direita quase não sofreria alterações (seriam subtraídos valores muito baixos), enquanto à parte esquerda seriam subtraídos valores muito próximos dos originais, ficando os números digitais muito próximos de zero. Desta forma, o nível de cinzento de cada pixel da imagem obtida foi subtraído a um valor fixo. O valor usado foi 127, por ser o valor médio do intervalo de valores de cinzento disponíveis, mas poderia ter sido utilizado outro. Esta operação permitiu a construção de uma matriz, cujos elementos das colunas da esquerda (correspondentes à zona clara) são negativos, pois os números digitais na imagem anterior eram superiores a 127 e os elementos das colunas da direita, isto é, das colunas relacionadas com a zona escura, são positivos. A matriz anterior foi adicionada à

imagem original. Nas zonas demasiado claras, foram adicionados valores negativos, enquanto nas zonas escuras foram adicionados valores positivos. Deste modo, obteve-se uma imagem radiometricamente homogénea, como é visível na Figura 4.16.

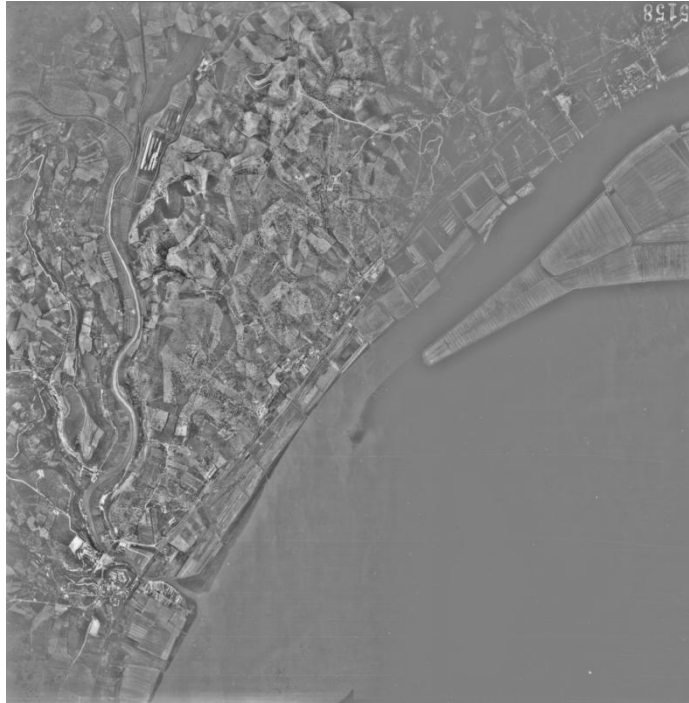


Figura 4.16 – Imagem com grandes discontinuidades radiométricas depois do tratamento com o terceiro algoritmo.

Observa-se que a zona inicialmente escura apresenta-se um pouco “baça” na imagem resultante. Este efeito não é um “efeito secundário” do tratamento efectuado. A imagem original encontrava-se muito danificada, havendo zonas onde a informação não existia e, portanto, não foi possível recuperá-la por completo. Apesar deste efeito, foi bastante a quantidade de informação que um algoritmo relativamente simples conseguiu recuperar de uma imagem com problemas tão acentuados. Comparando as superfícies de luminosidade, antes e depois do processamento, na Figura 4.17, verifica-se que a imagem antes do processamento (esquerda) apresentava uma tonalidade muito escura, não só na parte direita, mas também junto às margens. Depois do processamento (direita), a luminosidade tornou-se muito mais homogénea, estando os valores de cinzento representados muito próximos entre si. Verificou-se, ainda, que os cantos da imagem já não apresentam números digitais baixos, encontrando-se, agora, muito semelhantes ao resto da imagem.

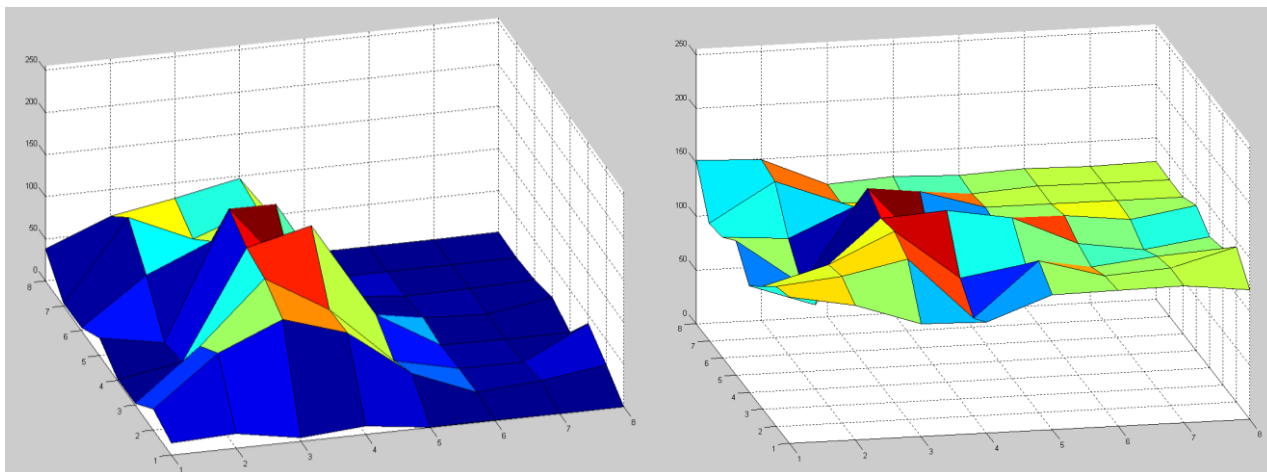


Figura 4.17 – Comparação das superfícies de luminosidade de uma imagem depois de processada com o terceiro algoritmo.

4.5. Comparação dos Algoritmos de Tratamento de Imagem

Devido à diversidade de problemas radiométricos apresentados pelas imagens do voo RAF47, foi necessário desenvolver três algoritmos distintos, cada um destes direccionado para um tipo de recuperação diferente. A construção deste programa foi uma tarefa complexa, tendo sido necessários três meses de trabalho até obter a versão final. A maior parte deste tempo foi despendida na construção do segundo algoritmo – “Luminosidade Variável”. O maior problema deste tipo de processamento consistiu na optimização do algoritmo para que fosse possível processar as imagens sem a ocorrência de erros de memória.

O primeiro tipo de tratamento – “Luminosidade Heterogénea” – foi construído para uniformizar as imagens ao longo do mosaico, sem ter em conta as diferenças de luminosidade no interior das fotografias. Este algoritmo foi utilizado para processar as imagens depois de estas já terem sido tratadas com as outras duas opções, a fim de as tornar todas semelhantes entre si. Como as imagens resultantes do segundo algoritmo ficaram demasiado escuras, o processamento com o primeiro método, tornou-as globalmente mais claras. Este facto permitiu uma pequena recuperação dos cantos da imagem, uma vez que lhes foi “adicionada alguma luz”, como é visível na Figura 4.18.

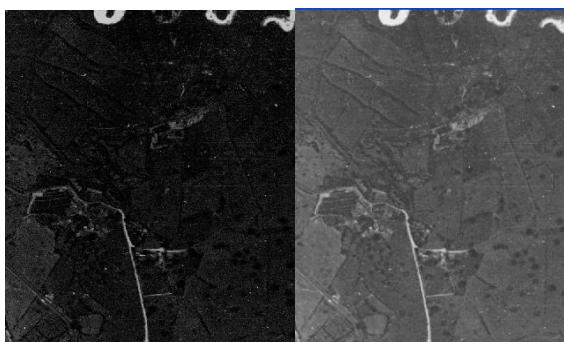


Figura 4.18 – Canto de uma imagem antes (esquerda) e depois (direita) de processada com a segunda e primeira opção de tratamento.

Quanto à terceira metodologia, apesar de esta apenas ter sido construída para recuperar uma imagem em particular, este último algoritmo produziu resultados, aparentemente, mais satisfatórios que o “Luminosidade Variável”: a imagem ficou com uma luminosidade mais homogénea e não se verificou o escurecimento exagerado das zonas de cultivo. A Figura 4.19 apresenta o histograma da imagem tratada com a terceira opção de processamento. Em nenhum dos dois tipos de processamento foi possível realizar um aumento do contraste, pois após esta operação, os cantos e as margens da imagem tornaram-se muito escuros, forçando o centro desta a ficar demasiado claro, o que acentuou mais as diferenças radiométricas entre imagens vizinhas.

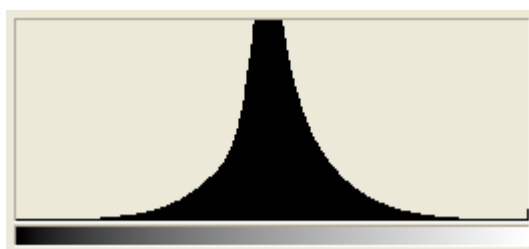


Figura 4.19 – Histograma da imagem tratada com o terceiro algoritmo.

Qualquer projecto tem de ter em conta três aspectos de importância vital: desempenho, tempo e custo; sendo uma das tarefas mais complexas de um projecto a capacidade de encontrar uma solução de compromisso entre os três factores. No caso do programa de tratamento de imagens, entenda-se custo como sendo a utilização de memória. O objectivo da recuperação radiométrica efectuada no âmbito deste trabalho foi a construção de um programa

que permitisse tornar a luminosidade das imagens em estudo mais homogénea, não eliminando pormenores destas, tendo em conta a capacidade do computador e o tempo de vida do projecto. Apesar da terceira forma de processamento aparentemente produzir melhores resultados, o facto de o filtro média ser a única forma de simplificação da imagem, implica que a janela utilizada tem de ter um raio relativamente grande, para simplificar a imagem de forma a não deixar visível qualquer tipo de pormenores. Esta imposição torna a execução do algoritmo muito lenta, o que inviabilizou a utilização deste método para tratar todas as imagens do projecto. Durante o projecto, foram utilizadas duas versões diferentes de Matlab[®]. A imagem em estudo para a terceira forma de tratamento foi processada já com a versão mais recente, a qual permite obter resultados mais rapidamente. O tempo de processamento desta foi de 5 horas. No entanto, 70% das imagens tiveram de ser processadas com a versão mais antiga. A estimativa de duração do processamento da imagem com a terceira técnica, caso esta tivesse sido tratada com a versão mais antiga do programa, foi de 22 horas e 30 minutos. O tratamento de todas as imagens, com a versão antiga do Matlab[®] e com a terceira forma de processamento, tornava impossível a execução do trabalho no tempo previsto para a vida do projecto, sendo esta a razão pela qual a segunda opção de processamento foi utilizada.

A única forma eficaz de saber qual dos algoritmos é o melhor, é realizando a triangulação automática com imagens processadas das diferentes formas e verificando qual destes dá origem a uma maior quantidade de pontos homólogos correctos. O facto de um dos algoritmos produzir imagens visualmente mais agradáveis, não significa que este seja o que conduz a uma triangulação com maior sucesso.

5. Capítulo V – Recuperação Geométrica

5.1. Orientação Interna

Para que um conjunto de fotografias possa ser utilizado para fins fotogramétricos, entre outros elementos, é necessário conhecer a posição relativa entre a objectiva e a imagem, no momento em que esta última foi tirada. Os elementos que permitem efectuar esta relação são a distância entre o centro de projecção e o plano imagem, denominada por distância focal, e o pé da perpendicular baixada do centro de projecção até ao plano imagem – ponto principal da imagem [Gruber, 1931; Schwidofsky, 1943]. De acordo com American Society of Photogrammetry (1980), o centro de projecção é o ponto de origem dos raios perspectivais e o plano imagem pode ser definido como o plano, no interior da câmara, que suporta o filme fotográfico. No entanto, os princípios da geometria projectiva (fundamentais para obter informação métrica a partir da fotografia) apenas podem ser aplicados no caso de existir um único centro de projecção e de as lentes não apresentarem aberrações, ou seja, de os raios luminosos que as atravessam não serem refractados [Gruber, 1931]. Desta forma, para retirar informação métrica das imagens, é imprescindível conhecer as características das distorções geométricas do sistema de lentes. Os elementos expostos: distância focal, o ponto principal da imagem e as distorções das lentes são conhecidos como sendo os elementos de Orientação Interna [American Society of Photogrammetry, 1980]. Actualmente, estes elementos são determinados através da calibração periódica da câmara aérea. Os parâmetros determinados durante a calibração são a distância focal equivalente (a qual tem como referência o ponto central das lentes), a distância focal calibrada ou constante da câmara (o valor que conduz a uma distribuição média das distorções radiais pela imagem), distorções radiais das lentes, coordenadas foto do ponto principal, distâncias entre marcas fiduciais opostas, ângulo de intersecção entre os eixos do sistema de coordenadas foto e a curvatura do plano imagem [Wolf, 1974].

Todas as câmaras fotográficas aéreas analógicas possuem, no plano de vidro contra o qual o filme é planificado, as marcas fiduciais. A sua forma depende do objectivo do voo e o seu número também é variável. Normalmente, existem apenas quatro marcas, as quais tanto podem estar localizadas nos pontos médios de cada uma das margens, como nos cantos. No

entanto, existem modelos que apresentam oito marcas fiduciais. Estes casos estão direccionados para serem utilizados em fotogrametria analítica. Quando a fotografia é tirada, estas marcas ficam gravadas no negativo. O ponto de intersecção das rectas que unem marcas fiduciais opostas é denominado por ponto de colimação. O objectivo dos fabricantes de câmaras aéreas analógicas era que o ponto de colimação e o ponto principal da imagem fossem coincidentes, o que raramente se verificava. Por esta razão, durante o processo de calibração da câmara, eram determinadas as coordenadas foto do ponto principal relativamente ao ponto de colimação. Normalmente, esta diferença é de poucos milímetros. As linhas que unem as marcas fiduciais opostas são, ainda, utilizadas para definir o sistema de coordenadas foto (Figura 5.1). O objectivo deste sistema de coordenadas é descrever a posição de pontos pertencentes à imagem relativamente ao centro de projecção, o qual é a origem do referido sistema de coordenadas. O eixo dos $z\bar{z}$ coincide com o eixo óptico e o semi-eixo que intersecta o negativo é o semi-eixo positivo. O eixo das abcissas é paralelo à recta que une duas marcas fiduciais opostas e que coincide com a direcção de voo. O sentido positivo deste eixo coincide com o sentido de voo. O eixo das ordenadas é perpendicular ao anterior. O semi-eixo positivo é obtido rodando o semi-eixo positivo do eixo dos xx 90° no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio [Wolf, 1974].

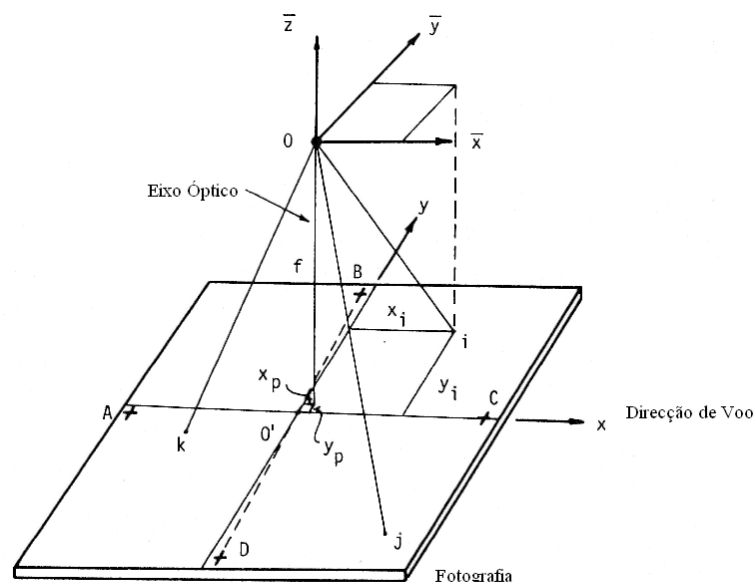


Figura 5.1 – Sistema de coordenadas foto, definido pelos eixos \bar{x} \bar{y} \bar{z} . Adaptada de American Society of Photogrammetry (1980).

5.1.1. Orientação Interna das Fotografias do Voo RAF47

Actualmente, quando uma câmara aérea é calibrada, é elaborado um relatório de calibração, o qual fornece as informações necessárias para a execução da Orientação Interna das imagens obtidas com a câmara. Para além de outros dados, este relatório contém os valores calibrados da distância focal, das coordenadas foto do ponto principal, do ponto de simetria (ponto situado no plano imagem, em redor do qual todas as distorções desta são simétricas [American Society of Photogrammetry, 1980]), das coordenadas foto das marcas fiduciais e, ainda, informação relativa às distorções radiais e tangenciais das lentes.

Infelizmente, quando o voo em estudo foi realizado, não era comum serem elaborados certificados de calibração. O facto do valor da constante da câmara ter sido encontrado foi de extrema importância, pois esse é um dado sem o qual teria sido impossível recuperar a Orientação Interna das imagens trabalhadas neste projecto, inviabilizando, desta forma, a realização da Triangulação Aérea. No entanto, do conjunto de informações fornecidas pelo relatório de calibração, este é o único dado conhecido. De acordo com Wolf (1974), os pequenos valores das coordenadas foto do ponto principal, tornam-nos desprezáveis para a maior parte das aplicações fotogramétricas. As correcções para as distorções das lentes podem ser obtidas durante o processo de triangulação aérea, através do cálculo dos parâmetros de auto-calibração. Os únicos dados de importância vital que não podem ser obtidos sem ter acesso ao certificado de calibração são as coordenadas foto calibradas das marcas fiduciais. Contudo, no decorrer deste projecto, foi desenvolvida uma estratégia para contornar esta dificuldade.

5.1.2. Marcas Fiduciais e Sistema de Coordenadas Foto

As imagens do RAF47 têm como informações marginais apenas as marcas fiduciais. Cada imagem tem apenas quatro marcas e estas situam-se a meio das margens. As quatro marcas fiduciais consistem em metades de setas, cindidas pelo seu eixo de simetria, localizadas sobre a imagem, e estão associadas duas a duas, uma vez que marcas em margens opostas têm dimensões semelhantes entre si e diferentes das dimensões das marcas do outro conjunto. Na Figura 5.2 estão representadas uma marca de cada tipo: a marca da esquerda é uma das marcas de maior dimensão, enquanto a da direita é uma das menores.

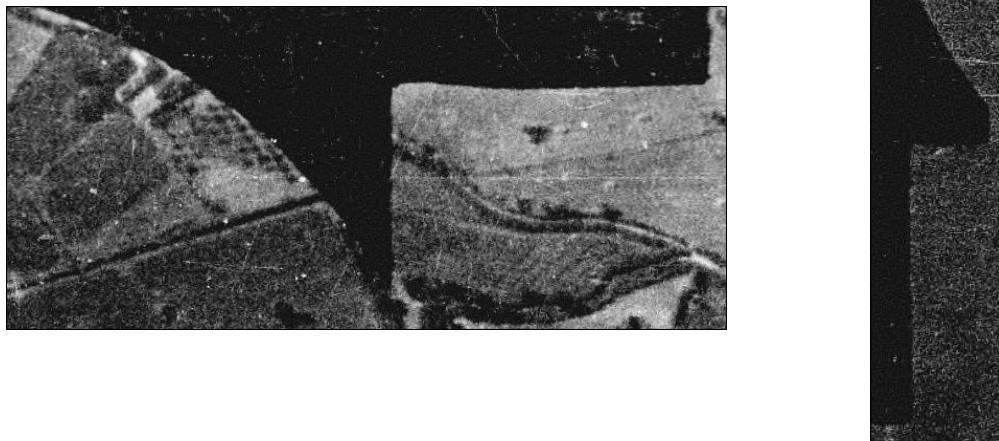


Figura 5.2 – Marcas fiduciais do voo RAF47 (IGeoE).

De acordo com a American Society of Photogrammetry (1944), as marcas de maior tamanho indicam o sentido de voo. Segundo a mesma fonte, as outras marcas têm dimensão menor para se distinguirem das primeiras e para ocultarem uma menor área de pormenores representados.

A inexistência de certificado de calibração da câmara levou à realização de diversas tentativas de medição das marcas fiduciais, a fim de encontrar a forma correcta de determinar a Orientação Interna das imagens. As referidas experiências conduziram à suspeita de que o facto das marcas fiduciais serem setas tem, ainda, outro objectivo: estas indicam o sentido dos eixos xx e yy do sistema de coordenadas foto, no negativo, quando visto através da objectiva. Tudo indica que as marcas de maiores dimensões mostram o sentido do eixo das abcissas (o que é coerente com o facto de estas apontarem o sentido de voo, tal como este eixo), enquanto as menores indicam o sentido do eixo das ordenadas. Para transformar o negativo em positivo, é necessário trocar os sentidos a ambos os eixos e para observar o positivo é preciso rodar o sistema de coordenadas foto mencionado 180° em torno do eixo dos yy . A Figura 5.3 mostra, para cada um dos sentidos de voo em que as imagens trabalhadas foram adquiridas, um esquema das suas marcas fiduciais e do seu sistema de coordenadas foto no positivo. Note-se que este sistema de coordenadas é apenas a projecção dos eixos dos xx e yy no plano imagem, pois o verdadeiro sistema de coordenadas foto tem origem no centro de projecção.

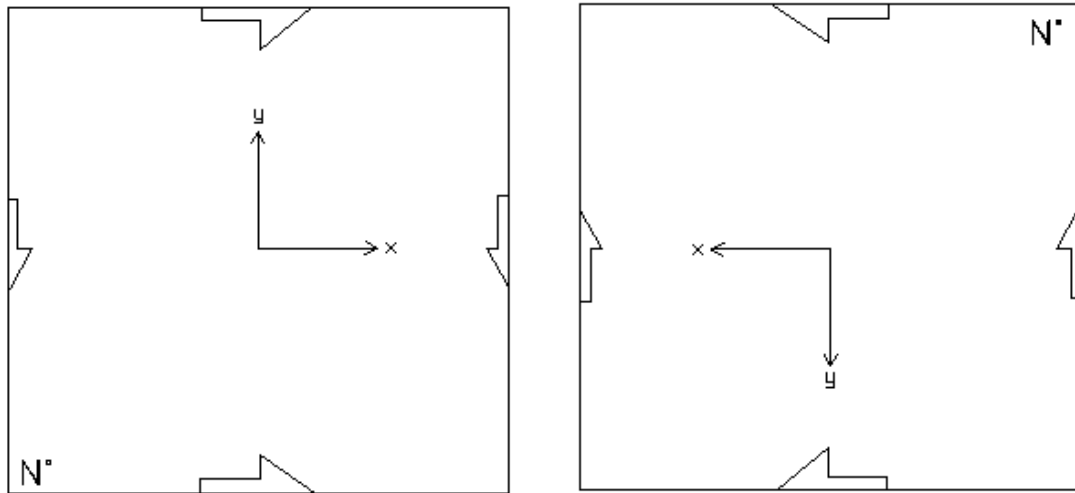


Figura 5.3 – Esquema das marcas fiduciais e dos sistemas de coordenadas foto em imagens obtidas em sentidos opostos: de Oeste para Este (esquerda) e de Este para Oeste (direita).

As marcas de dimensões menores apontam para o número da fotografia. Todas as imagens possuem um número gravado, por vezes sobre a margem, outras vezes sobre a imagem, ocultando alguns detalhes representados (Figura 5.4). Esta inconstância na localização do número pode indicar que o registo deste sobre a fotografia é independente da câmara. De facto, o número parece ter sido carimbado sobre o filme depois das imagens terem sido obtidas.



Figura 5.4 – Número representado sobre a imagem (IGeoE).

Em nenhuma das quatro marcas fiduciais existe um ponto único destinado a ser medido para determinar a Orientação Interna. Na época em que as fotografias aéreas foram obtidas, estas eram destinadas a ser orientadas num estereorrestituídor analógico, em que bastava colocar as quatro marcas fiduciais sobre quatro segmentos de recta representados no aparelho, para a sua Orientação Interna ficar determinada. No caso das marcas fiduciais utilizadas no voo RAF47, bastava alinhar as partes rectas das quatro setas (que se intersectam no centro da imagem) com os quatro segmentos, para a Orientação Interna ficar determinada

[American Society of Photogrammetry, 1944]. Apesar de este princípio funcionar na época em que as imagens foram obtidas, e na qual estavam destinadas a ser utilizadas, actualmente os trabalhos fotogramétricos são feitos em estações fotogramétricas digitais, nas quais não é possível fazer a Orientação Interna desta forma. De acordo com a American Society of Photogrammetry (1944), o género de marcas fiduciais utilizadas no voo RAF47 nunca foi usado para a obtenção de fotografias aéreas destinadas à produção cartográfica. Estas marcas eram mais apropriadas para a realização de interpretação fotográfica.

No decorrer deste projecto, foi definido que, para orientar internamente as imagens, bastaria seleccionar um ponto qualquer da marca fiducial, desde que este pertencesse à parte recta da seta. Esta indefinição relativa ao ponto a medir é aceitável, uma vez que o centro da fotografia é definido pela intersecção das rectas que unem as marcas fiduciais opostas e que passam pelos segmentos de recta em questão [American Society of Photogrammetry, 1944]. Logo, qualquer um dos pontos que pertença aos referidos segmentos, pertence, também, às rectas e, portanto, permite calcular os Parâmetros de Transformação Afim.

5.1.3. Parâmetros de Transformação Afim

Os programas actuais que trabalham com imagens associam a cada uma destas um sistema de coordenadas próprio: o sistema de coordenadas pixel. A definição desse sistema pode variar de programa para programa, mas a maioria considera o eixo das abcissas como sendo um eixo horizontal, orientado da esquerda para a direita. Trata-se, portanto, de um eixo relacionado com as colunas da imagem. Quanto ao eixo das ordenadas, este é vertical e costuma ser orientado de cima para baixo, sendo relativo às linhas da imagem. A unidade deste sistema de coordenadas é o pixel, podendo este ser inteiro ou decimal. Há programas que consideram a origem do sistema de eixos (o primeiro pixel do canto superior esquerdo) como tendo as coordenadas (0,0), enquanto outros utilizam os valores (1,1).

Todas as medições efectuadas nas imagens, nomeadamente, as marcas fiduciais e os Pontos Fotogramétricos, são efectuadas relativamente ao sistema de coordenadas pixel. Contudo, o modelo matemático subjacente à Triangulação em Bloco por Feixes Perspectivos (o tipo de Triangulação que foi realizado) são as Equações de Colinearidade, as quais apenas permitem relacionar coordenadas terreno com coordenadas foto. Desta forma, é fundamental encontrar uma forma de relacionar o sistema de coordenadas pixel com o sistema de coordenadas foto, de forma a ser possível transformar as coordenadas de todos os pontos

medidos para o sistema de coordenadas pretendido. Os valores que permitem realizar esta transformação são os Parâmetros de Transformação Afim.

Os Parâmetros de Transformação Afim são seis e podem ser apresentados de duas formas distintas: os parâmetros que transformam coordenadas pixel em coordenadas foto ou os que permitem efectuar a transformação inversa, ou seja, converter coordenadas foto em coordenadas pixel. Cada programa de triangulação funciona apenas com um destes conjuntos de valores. No caso do programa utilizado neste projecto, o ISAT[®], este funciona com os parâmetros de transformação de coordenadas foto em coordenadas pixel. À semelhança dos outros programas do género, também no ISAT[®], os Parâmetros de Transformação Afim são calculados através do Método dos Mínimos Quadrados. Uma vez que as coordenadas foto das marcas fiduciais calibradas são fornecidas no certificado de calibração da câmara, basta medir as coordenadas dos mesmos pontos no programa, para obter as respectivas coordenadas pixel. Com este conjunto de observações e de dados conhecidos, é possível construir quatro conjuntos de equações do género:

$$X_{Pi} = a_0 + a_1x_i + a_2y_i$$

$$Y_{Pi} = b_0 + b_1x_i + b_2y_i$$

onde i é um número inteiro que varia entre 1 e 4 e corresponde a cada uma das quatro marcas fiduciais; X_{Pi} e Y_{Pi} são as coordenadas pixel de cada marca fiducial; x_i e y_i as respectivas coordenadas foto; a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 e b_2 são os Parâmetros de Transformação Afim que se pretende determinar. Como este modelo matemático pode ser escrito na forma $F(x,l,c)=0$, onde x é o vector das estimativas dos valores dos parâmetros, l é o vector das observações ajustadas e c é um vector de constantes, pode ser utilizado um ajustamento combinado para obter as correcções aos valores iniciais dos Parâmetros de Transformação Afim (δ), através da fórmula:

$$\delta = - (A^T(BP_l^{-1}B^T)^{-1}A)^{-1}A^T(BP_l^{-1}B^T)^{-1}w$$

onde A é a primeira matriz de configuração (derivada das equações em ordem aos parâmetros a determinar), B é a segunda matriz de configuração (derivada das equações em ordem às observações efectuadas), P_l é a matriz de pesos das observações e w é o vector de fecho. Depois de obtidas as correcções δ , basta adicioná-las aos valores iniciais dos parâmetros para obter os valores desejados [Mendes, 2005].

Contudo, no caso do voo RAF47, como não existe certificado de calibração da câmara, as coordenadas foto calibradas das marcas fiduciais não são conhecidas, não sendo, por isso, possível calcular os Parâmetros de Transformação Afim da forma acima exposta. Por esta razão foi necessário encontrar uma forma de “enganar” o programa ISAT[®]. Para isso, foi medida, em milímetros, numa imagem, sobre o negativo original, a distância entre duas marcas fiduciais opostas (para os dois conjuntos de marcas). Os valores dessas leituras, depois de divididos por dois, foram introduzidos no ISAT[®] como se fossem as verdadeiras coordenadas foto das marcas fiduciais. No entanto, esta estratégia apenas foi utilizada para que fossem criados os ficheiros necessários para o projecto. Os valores introduzidos apenas são utilizados pelo programa para calcular os Parâmetros de Transformação Afim. Após o cálculo destes, os valores das coordenadas foto das marcas fiduciais não voltam a ser utilizados pelo ISAT[®]. Desta forma, os Parâmetros de Transformação Afim correctos foram determinados por outro processo, exterior ao ISAT[®], sem recorrer às coordenadas foto das marcas fiduciais e, posteriormente, substituíram, nos ficheiros do projecto, os valores errados calculados pelo programa.

Os valores correctos dos Parâmetros de Transformação Afim podem ser obtidos apenas através das coordenadas pixel das marcas fiduciais. Para tal, é indispensável conhecer o significado geométrico de cada um deles.

Os sistemas de coordenadas pixel e foto não apresentam a mesma origem. Enquanto o sistema de coordenadas pixel tem origem no canto superior esquerdo da imagem, as coordenadas foto são medidas a partir do centro desta. Portanto, o primeiro passo para transformar coordenadas de um sistema para outro é efectuar uma translação do centro da imagem para o seu canto superior esquerdo (uma vez que estão a ser consideradas as fórmulas de transformação de coordenadas foto em coordenadas pixel). Para realizar a translação, é necessário calcular as coordenadas pixel (x_c, y_c) da origem do sistema de coordenadas foto, ou mais precisamente, do ponto de intersecção das rectas que unem as marcas fiduciais opostas. Se forem conhecidos dois pontos \vec{P}_i e \vec{P}_j pertencentes a uma recta, a sua equação na forma vectorial pode ser escrita como: $\vec{P}_i + t(\vec{P}_j - \vec{P}_i)$, onde t toma todos os valores reais. A equação de uma recta pode ser, ainda, escrita como uma função vectorial de uma variável real $\vec{X}(t) = \vec{P}_i + t(\vec{P}_j - \vec{P}_i)$ [Apostol, 1985]. Sejam $\vec{P}_i = (x_i, y_i)$, com $i = 1, \dots, 4$, os pontos pertencentes às quatro marcas fiduciais, sendo x_i e y_i as suas coordenadas pixel. As equações vectoriais das rectas que unem as marcas fiduciais números 1 e 3 e números 2 e 4 são, respectivamente, $\vec{P}_1 + t(\vec{P}_3 - \vec{P}_1)$ e $\vec{P}_2 + t(\vec{P}_4 - \vec{P}_2)$. Para conhecer as coordenadas pixel do centro da fotografia basta

substituir, numa função vectorial correspondente a uma das equações anteriores, o valor de t na situação em que as duas equações expostas são iguais, ou seja, na situação em que as duas rectas se intersectam.

Como os dois sistemas de coordenadas têm escalas diferentes, pois a unidade do sistema de coordenadas pixel é o pixel e a do sistema de coordenadas foto é o milímetro, é necessário converter milímetros para pixels. Este factor de escala, μ , consiste no inverso do tamanho do pixel: 0,021 mm. Se o pixel fosse rectangular, era necessário considerar um factor de escala para o eixo dos xx e outro para o eixo dos yy . No caso das imagens utilizadas neste projecto, como o pixel é quadrado, o factor de escala é igual para ambos os eixos.

O sistema de coordenadas pixel, por definição, está sempre alinhado com a imagem e como esta é sempre rectangular, os dois eixos são perfeitamente perpendiculares entre si. O mesmo não acontece com o sistema de coordenadas foto. Este é definido através das rectas que unem as marcas fiduciais opostas, as quais estão registadas sobre a imagem, em suporte analógico, sujeitas a todo o tipo de deformações. O facto de as imagens se encontrarem, originalmente, em suporte analógico e terem sido, posteriormente, digitalizadas também foi uma fonte de erro, uma vez que é impossível garantir que a imagem estava perfeitamente direita durante esta operação. Todos estes factores conduzem a distorções nos eixos do sistema de coordenadas foto, tais como a inclinação do eixo das abcissas deste sistema relativamente ao do sistema de coordenadas pixel e a não ortogonalidade dos seus eixos (Figura 5.5).

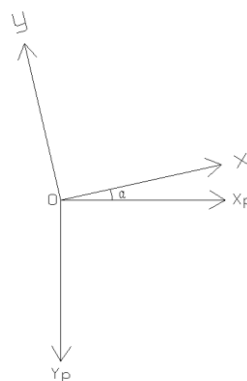


Figura 5.5 – Rotação entre os sistemas de coordenadas pixel (X_pOY_p) e foto (xOy).

Desta forma torna-se necessário determinar a matriz de rotação entre os dois sistemas, a qual pode ser deduzida a partir da figura anterior. Seja α o ângulo entre os eixos dos xx dos

dois sistemas e ε o enviesamento do sistema de coordenadas foto, ou seja, a diferença entre um ângulo recto e o ângulo entre os eixos Ox e Oy. A matriz de rotação entre um sistema e outro é dada por:

$$R_{\alpha} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\text{sen}(\alpha + \varepsilon) \\ -\text{sen}(\alpha) & -\cos(\alpha + \varepsilon) \end{bmatrix}$$

Juntando todos os passos acima expostos, obtêm-se as fórmulas de transformação de coordenadas foto para coordenadas pixel.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu \cos(\alpha) & -\mu \text{sen}(\alpha + \varepsilon) \\ -\mu \text{sen}(\alpha) & -\mu \cos(\alpha + \varepsilon) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix}$$

onde a_0 e b_0 são as duas translações (em x e y , respectivamente), a_1 , a_2 , b_1 e b_2 são os quatro elementos da matriz de rotação multiplicados pelo factor de escala, x_f e y_f são as coordenadas foto do ponto a transformar e x e y são as coordenadas pixel do mesmo. Os parâmetros a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , b_1 e b_2 são os seis Parâmetros de Transformação Afim que são necessários para introduzir, um conjunto por imagem, nos ficheiros do projecto.

Os cálculos anteriores estão inseridos num programa em Matlab[®], desenvolvido pela Professora Doutora Paula Redweik, o qual é denominado por ORIRAF47. Após a introdução de alguns dados iniciais, como a resolução de digitalização (em *dpi*) e a constante da câmara (em milímetros), este programa determina, para cada imagem, os seis Parâmetros de Transformação Afim. Através de um outro programa, também desenvolvido pela Professora Doutora Paula Redweik, denominado por TIO, os valores calculados pelo ORIRAF47 são colocados no ficheiro das Orientações Internas que é criado pelo ISAT[®] em cada projecto. Para gerar este ficheiro no ISAT[®], basta efectuar as observações manuais das coordenadas pixel das marcas fiduciais de uma imagem. O programa TIO é responsável pela construção de um ficheiro semelhante a este, com uma estrutura idêntica para todas as imagens do projecto, e pela substituição dos valores dos Parâmetros de Transformação Afim.

5.1.4. Determinação da Orientação Interna das Fotografias Aéreas sem Certificado de Calibração

A inexistência de certificado de calibração da câmara utilizada para obter as fotografias foi um dos maiores desafios que teve de ser enfrentado durante a realização deste

projecto. Para além da ausência dos valores calibrados de várias constantes fundamentais para o sucesso do projecto, a falta de identificação da posição que cada uma das marcas fiduciais ocupava no momento de exposição foi um dos problemas mais graves de todo o trabalho realizado, tendo sido um dos problemas que mais prejudicou a realização da triangulação aérea.

Numa fotografia aérea, as marcas fiduciais, para além de permitirem a determinação da posição do ponto de colimação da imagem e a definição do sistema de coordenadas foto, são ainda responsáveis pelo conhecimento da posição em que a imagem se encontrava dentro da câmara. Para definir correctamente o sistema de coordenadas foto, isto é, para determinar os Parâmetros de Transformação Afim, é indispensável medir as marcas fiduciais pela ordem correcta. A ordem pela qual as marcas são medidas tem influência directa no sentido dos eixos do sistema de coordenadas foto e, portanto, é fundamental conhecer não só qual é a primeira marca que deve ser medida, mas também, a ordem pela qual as restantes devem ser observadas. Esta informação, normalmente, é fornecida pelos certificados de calibração, nos quais costuma ser apresentado um esquema da imagem, com as marcas fiduciais representadas e identificadas com o número de ordem pela qual devem ser registadas. Independentemente da posição do avião, isto é, da direcção e sentido da fiada a ser voada, a primeira marca fiducial é sempre a mesma. Contudo, como a posição do avião varia ao longo do projecto, essa marca pode-se encontrar em posições diferentes quando as imagens são organizadas e colocadas na posição correcta para construir um mosaico. Por exemplo, numa fiada voada de Este para Oeste, a primeira marca é a que está na margem de baixo, mas numa fiada voada no sentido oposto, a mesma marca aparece representada na margem de cima. No entanto, relativamente às informações marginais também presentes no plano de vidro da câmara onde estão as marcas fiduciais, a posição da primeira marca é sempre a mesma. Esta é a razão pela qual os eixos dos sistemas de coordenadas foto apresentam orientações diferentes consoante o sentido de voo, como demonstrado na Figura 5.3.

Na ausência de qualquer informação oficial relativa à forma como as marcas fiduciais deviam ser medidas, a única solução encontrada para contornar este problema foi a realização de várias experiências, onde foram consideradas diversas formas de medição das marcas. O ISAT[®] permite a modificação de três factores no que diz respeito à Orientação Interna das imagens: posição da primeira marca, sentido da medição e orientação da câmara. Para o primeiro factor existem quatro possibilidades, isto é, qualquer uma das quatro marcas fiduciais pode ser a primeira a ser registada. Para o sentido da medição existem duas possibilidades: o sentido do movimento dos ponteiros do relógio ou o sentido contrário.

Quanto à orientação da câmara, esta é uma variável que está relacionada com a direcção e o sentido de cada uma das fiadas voadas. Pode apresentar os valores 0°, 90°, 180° ou 270°.

Com o intuito de determinar a forma correcta de medição das marcas fiduciais, foi criado um projecto no ISAT[®] destinado à execução de testes. Para tal, foi construído um bloco constituído por cinco imagens, pertencentes a duas fiadas adjacentes e com sentidos opostos. Foram realizadas tentativas de Orientação Interna destas imagens, utilizando as várias possibilidades de combinação dos três factores acima expostos. Após cada um dos testes, foi realizada uma triangulação automática das cinco imagens e foi registada a quantidade e a qualidade dos pontos homólogos detectados. Os resultados encontram-se na Tabela 5.1. Os valores de orientação da câmara apresentados na primeira coluna são os valores atribuídos às imagens pertencentes às fiadas voadas de Este para Oeste. Os valores atribuídos às imagens da outra fiada diferem 180° relativamente a estes. Quanto ao sentido da medição, “Ponteiros” significa que as marcas foram medidas no sentido dos ponteiros do relógio e “Contrário” indica que estas foram medidas no sentido oposto. A terceira coluna mostra qual a posição da primeira marca a ser medida em cada tentativa, relativamente ao número (a única informação marginal existente). A coluna “Percentagem” indica qual a percentagem do processo de triangulação automática que foi realizada. O valor 100% significa que a triangulação automática chegou ao fim, enquanto o valor 20% é o ponto do processamento em que ocorreu um erro e o processamento foi interrompido. O valor “Sigma” indica, em micrómetros, a precisão das coordenadas foto resultantes da TA. No que diz respeito aos pontos homólogos, estes foram classificados quanto à qualidade, com as descrições “Certos” ou “Errados”. Para atribuir esta classificação, foi observado um conjunto de pontos em cada um dos processamentos que chegaram ao fim e foi verificado se estes pontos eram, de facto, comuns às várias imagens. Na classificação em termos de “Quantidade”, a classe “Muitos” corresponde a um elevado número de pontos encontrados e bem distribuídos pelas imagens, o que corresponde à solução procurada. A classe “Alguns” foi atribuída a soluções onde foram encontrados menos pontos que na anterior e a sua distribuição na foto era pior, encontrando-se estes aglomerados em apenas algumas localizações da imagem. A designação “Poucos” foi associada a um conjunto de testes, nos quais foram encontrados apenas seis pontos homólogos.

Tabela 5.1 – Resultados das experiências realizadas com a Orientação Interna.

Or. Câmara E-O	Sentido da Medição	Primeira Marca	Porcentagem	Sigma	Pontos Homólogos	
					Qualidade	Quantidade
0	Ponteiros	Lado do Número	100	29	Certos	Muitos
0	Ponteiros	Lado Oposto	20			
0	Contrário	Lado do Número	20			
0	Contrário	Lado Oposto	100	19	Errados	Poucos
180	Ponteiros	Lado do Número	20			
180	Ponteiros	Lado Oposto	100	31,5	Certos	Muitos
180	Contrário	Lado do Número	100	16	Errados	Poucos
180	Contrário	Lado Oposto	20			
90	Ponteiros	Lado do Número	20			
90	Ponteiros	Esquerda do Número	20			
90	Ponteiros	Direita do Número	100	16	Errados	Poucos
90	Ponteiros	Direita do Número	100	33	Certos	Muitos
90	Ponteiros	Lado do Número	20			
90	Contrário	Esquerda do Número	100	17	Errados	Poucos
90	Contrário	Esquerda do Número	100	17	Errados	
90	Contrário	Lado do Número	100	17	Errados	
270	Ponteiros	Esquerda do Número	100	38	Certos	Muitos
270	Contrário	Esquerda do Número	100	26	Certos	Alguns
270	Ponteiros	Lado do Número	20			
270	Contrário	Lado do Número	20			

As linhas da tabela 5.1 que se encontram preenchidas a cor são as quatro soluções que permitiram obter um conjunto adequado de pontos homólogos. Como se pode verificar, para cada valor de orientação da câmara existe uma marca fiducial que pode ser considerada como sendo a primeira, de forma a conduzir a uma solução aparentemente satisfatória. Observou-se, ainda, que o sentido da medição das marcas deve ser o sentido dos ponteiros do relógio, pois a outra hipótese não levou a nenhuma solução aceitável. Contudo, das quatro hipóteses assinaladas, apenas uma pode conduzir a uma solução correcta. Numa primeira fase do trabalho, foi seleccionada a primeira combinação de factores assinalada a amarelo. Esta opção foi escolhida porque, para além de ser a solução mais precisa, os valores de orientação da câmara coincidiam com os utilizados nas triangulações feitas no IGeoE, para fiadas com a mesma orientação das consideradas neste projecto. No entanto, numa fase posterior do trabalho, verificou-se que esta foi uma escolha errada. Apesar de os pontos homólogos detectados estarem correctos, esta primeira solução conduziu a uma determinação incorrecta dos valores dos ângulos de rotação entre os eixos dos sistemas de coordenadas foto e objecto: *omega*, *fi* e *kapa*. Este problema foi detectado devido ao facto de o ângulo *kapa*, cujo valor aproximado foi determinado na triangulação automática, estar distanciado 180° do valor esperado. Como os ângulos *omega* e *fi* se apresentavam relativamente próximos de 0°, tal como esperado, não foi detectado nenhum problema nestes valores. Porém, como o valor de *kapa* estava visivelmente errado, era muito provável que estes dois também o estivessem. A

Orientação Interna determinada de forma errada era a causa mais provável para os erros observados. Estes erros nos valores de ω e ϕ causaram diversos problemas na Aetrotriangulação, como será explicado mais adiante. Uma vez que não foi possível detectar qualquer erro observando apenas os valores de ω e ϕ , para todos os testes que conduziram a uma solução aceitável em termos de pontos homólogos, foi observado o valor de κ e foi escolhida a única solução que apresentava os valores mais semelhantes aos esperados – a solução assinalada a laranja. Considerando esta solução como sendo a correcta, puderam ser inferidas algumas características da medição das marcas fiduciais em imagens do voo RAF47: o valor escolhido para a orientação da câmara deve ser o múltiplo de 90 mais próximo do valor esperado para o ângulo κ , a primeira marca fiducial a ser medida é sempre a marca situada do lado oposto ao do número e as restantes são medidas no sentido dos ponteiros do relógio. Estas conclusões apenas se aplicam à medição de marcas fiduciais sobre o positivo. As experiências efectuadas e a conclusão obtida a partir destas permitiram, ainda, a construção de um esquema das imagens contendo as marcas fiduciais e a forma como estas devem ser medidas (Figura 5.6). A imagem da esquerda representa uma imagem pertencente a uma fiada voada no sentido Oeste – Este e a da direita corresponde ao sentido Este – Oeste.

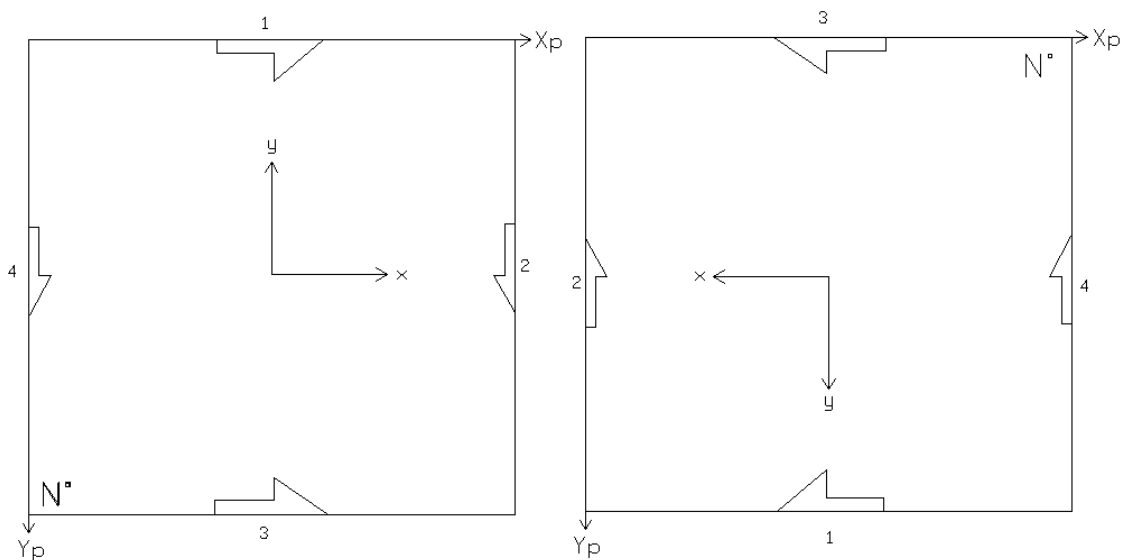


Figura 5.6 – Esquema dos sistemas de coordenadas pixel e foto, das marcas fiduciais e da respectiva ordem de medição, nos positivos.

Foram identificadas três fotografias onde não se conseguia observar uma das marcas fiduciais (a da margem inferior em todos os casos), não sendo possível calcular os Parâmetros de Transformação Afim. Foi observado em várias imagens, pertencentes às mesmas fiadas

que as imagens em questão, que a coordenada pixel x do centro da imagem, determinada da forma acima exposta, quando não apresentava um valor igual à média das coordenadas pixel x de marcas em margens opostas, a diferença entre estas não era superior a um pixel. Aproveitando esta propriedade, foi determinada a coordenada pixel x do ponto de colimação, para as três imagens, e como este pertence à recta que une as marcas opostas, a coordenada y foi obtida substituindo a coordenada x do ponto na equação da referida recta. Através destas coordenadas, $a_0=x_c$ e $b_0=y_c$, com as coordenadas pixel das restantes três marcas fiduciais foi possível obter os Parâmetros de Transformação Afim sem determinar as coordenadas da marca não visível. Apesar de este ser um método expedito para determinar os Parâmetros de Transformação Afim, esta técnica permitiu a utilização de três imagens situadas em localizações importantes, que de outra forma, teriam de ter sido retiradas do projecto.

5.1.5. Detecção Automática das Marcas Fiduciais

Apesar de, actualmente, existirem apenas 88% das fotografias adquiridas durante o voo, nos arquivos do IGeoE ainda estão armazenadas 10899 imagens. Neste projecto foi considerado apenas um pequeno conjunto de 169 imagens, mas a tarefa de medir manualmente quatro marcas fiduciais em cada fotografia é um processo demorado e moroso. Cada vez que for necessário realizar qualquer trabalho com as imagens do RAF47, será imprescindível determinar a Orientação Interna destas. Para simplificar esta operação, tanto no decorrer deste projecto, como para trabalhos futuros, foi construída uma rotina para detectar automaticamente as quatro marcas fiduciais, num conjunto de fotografias seleccionadas pelo utilizador. Esta rotina foi construída em Matlab® e acrescentada ao programa ORIRAF47. À semelhança do programa de tratamento radiométrico, também esta rotina foi desenvolvida de forma a permitir o processamento sem a presença do operador.

5.1.5.1. Algoritmo

Para incluir esta nova rotina no programa, foi criado um menu que permite ao utilizador escolher se quer executar uma medição manual ou automática. A versão automática apresenta algumas diferenças relativamente à manual, no que diz respeito à aquisição de alguns dados de entrada. Enquanto na versão manual, o utilizador selecciona em imagens panorâmicas as localizações aproximadas das marcas fiduciais, para cada uma das imagens,

na versão automática, o referido procedimento não fornecia resultados aceitáveis, pois as aproximações iniciais da localização das marcas numa imagem raramente eram boas aproximações para as imagens seguintes. Para além das distorções presentes na imagem, a posição variável em que as imagens foram digitalizadas foi a causa que mais contribuiu para este fenómeno. Para solucionar este problema, as aproximações iniciais das marcas fiduciais passaram a ser calculadas automaticamente, em função das dimensões de cada imagem. Como as marcas fiduciais situam-se aproximadamente no ponto médio de cada margem, dado que na fase de preparação das imagens estas foram cortadas de forma a minimizar a quantidade de margem visível, para valores das aproximações iniciais foram consideradas as coordenadas pixel dos pontos médios de cada margem. Tal como na versão manual, a partir destes valores aproximados foram construídos cortes nas imagens com 400 pixels \times 400 pixels. No entanto, a dimensão dos cortes efectuados ganha uma nova importância na detecção automática das marcas fiduciais. Como as marcas são detectadas através de técnicas de processamento digital de imagem, quanto menor for a área dos cortes, menor será o tempo de processamento. No entanto, os cortes têm de apresentar dimensões adequadas para conter a representação da marca completa.

Como já foi visto, dado que as fiadas consideradas no projecto têm sentidos diferentes, as marcas fiduciais, ao serem representadas através de setas, apresentam, também, configurações diferentes. Este aspecto tem uma importância vital para o processo de detecção automática. Por esta razão, foi necessário dividir o algoritmo em duas partes: uma para processar as imagens adquiridas em fiadas voadas de Este para Oeste e outra para as obtidas em sentido contrário. A versão automática de medição de marcas fiduciais obrigou, portanto, o programa ORIRAF47 a inquirir ao utilizador qual o sentido das fiadas cujas imagens são processadas. À semelhança da versão manual, esta nova rotina também só permite o processamento de imagens obtidas com o mesmo sentido de voo, em cada processamento.

5.1.5.1.1. Limiarização

Para efectuar uma análise dos objectos representados numa imagem, é conveniente separá-los do fundo da imagem através de técnicas de segmentação. Uma das técnicas mais comuns para a realização deste género de tarefas é a limiarização. Esta técnica necessita de um valor de cinzento para ser utilizado como fronteira. Se o objecto a isolar apresentar uma tonalidade clara sobre um fundo escuro, a todos os pixels que tiverem valores de cinzento

superiores ao valor de fronteira é atribuído o valor 1 e aos restantes corresponde o valor 0. Contudo, se o objecto a realçar for formado com pixeis que apresentem cor escura sobre um fundo claro, o algoritmo exposto será invertido: aos pixeis com números digitais inferiores ao valor de fronteira, é atribuído o valor 1 e aos restantes, o valor 0. Apesar da técnica parecer bastante simples de utilizar, esta não é perfeita e não fornece resultados óptimos para todas as imagens [Fisher *et al*, 2003f; Quantitative Imaging Group, 2009c]. A tarefa mais complicada da limiarização é a selecção de um valor de fronteira que origine resultados aceitáveis para o maior número de imagens possível. A situação ideal para realizar a limiarização é quando o histograma da imagem a transformar é bimodal, isto é, tem dois máximos relativos e a maioria dos pixeis apresentam valores de cinzento muito próximos de um ou outro máximo. Nesta situação, é provável que um dos máximos corresponda aos valores de cinzento pertencentes ao objecto que se pretende identificar, enquanto o outro esteja relacionado com os níveis de cinzento pertencentes ao fundo da imagem. Desta forma, o valor de fronteira ideal é um valor de cinzento que se situe entre os dois máximos, permitindo, assim a completa individualização do objecto relativamente ao fundo [Fisher *et al*, 2003a].

No caso dos cortes efectuados nas imagens do RAF47, os pixeis pertencentes às marcas fiduciais apresentavam cor escura, ou seja, números digitais baixos, sobre um fundo mais claro. O facto de a marca se situar sobre a imagem e não na margem dificultou a limiarização. Apesar de as dimensões dos cortes terem sido escolhidas de forma a garantir que a marca fiducial é o maior objecto representado em cada um, ainda permaneceram neste alguns pormenores da imagem, os quais, por vezes, apresentavam valores de cinzento semelhantes aos da marca fiducial. Aquando da realização da limiarização, estes pormenores foram, também, individualizados juntamente com as marcas.

Como a situação ideal para realizar uma limiarização é ter como entrada uma imagem com um histograma bimodal, a detecção das marcas fiduciais foi realizada nas imagens originais e não nas recuperadas com o programa apresentado no Capítulo IV. Nas imagens processadas, como estas possuem uma radiometria mais homogénea, os valores de cinzento na zona da marca fiducial são muito próximos, portanto, o seu histograma não é bimodal (Figura 5.7), conduzindo a uma probabilidade muito baixa de realizar uma limiarização com sucesso.

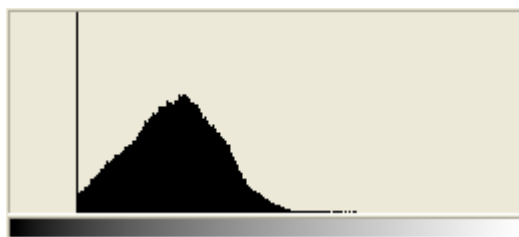


Figura 5.7 – Histograma de um corte efectuado numa imagem processada, na zona da marca fiducial.

Nas imagens originais, os pixels pertencentes à marca fiducial apresentavam tons mais escuros que na imagem tratada, pois mantinham os valores radiométricos originais, enquanto as imagens tratadas foram sujeitas a duas opções de processamento, as quais também actuaram sobre as marcas fiduciais. Desta forma, nas imagens originais, as marcas fiduciais apresentavam valores de cinzento muito baixos, enquanto os pormenores circundantes, na maioria das imagens, eram muito claros. Esta diferença de valores radiométricos deu origem a cortes com histogramas bimodais (Figura 5.8). A figura apresentada em baixo, mostra o histograma de um corte com as mesmas dimensões e efectuado na mesma zona da mesma imagem que o histograma da Figura 5.7, apenas com a diferença de o histograma da Figura 5.8 ser referente à imagem original, sem qualquer tipo de tratamento.

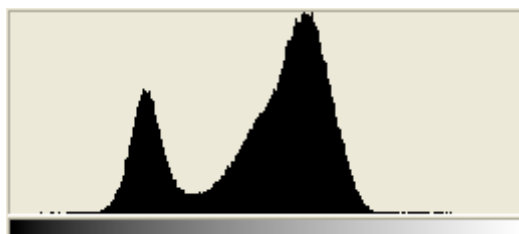


Figura 5.8 – Histograma de um corte efectuado numa imagem original, na zona da marca fiducial.

De acordo com Fisher *et al* (2003a), o valor que deve ser utilizado como fronteira é qualquer valor de cinzento que se situe entre os dois picos do histograma. Como as diversas tentativas efectuadas indicaram que não era viável utilizar um valor único como fronteira para todos os cortes, a fronteira escolhida foi o valor médio de cada histograma. Num histograma bimodal, o valor médio situa-se entre os dois picos, tal como se pretende que seja o valor de fronteira. A utilização do algoritmo em imagens com características diferentes, mostrou ser

necessário, para a realização de uma limiarização com sucesso, ter em conta o desvio padrão do histograma. Verificou-se que, para cortes cujo desvio padrão do histograma era menor que 25 números digitais, o valor médio do histograma era um bom valor de corte; enquanto para o caso contrário, o valor mais adequado era o valor médio subtraído de 20 unidades. A necessidade de efectuar esta subtracção pode ser explicada pelo facto de, como existe uma maior dispersão de valores de cinzento no corte, muitos níveis de cinzento estarem ocupados. No entanto, apenas os mais baixos pertencem à marca fiducial e, portanto, o valor de fronteira deve ser menor que na primeira situação. Para um baixo desvio padrão do histograma, apesar de existirem dois picos no histograma, os níveis de cinzento ocupados não estão muito afastados dos valores da marca e, por isso, basta utilizar o valor médio.



Figura 5.9 – Imagem resultante da limiarização e binarização de um corte contendo uma marca fiducial.

Depois de realizada a limiarização, todos os pixels do corte apresentam os números digitais 0 e 1. Contudo, estas imagens continuaram a ser imagens de cinzentos, ou seja, continuaram a ser imagens de 8 bits. Para realizar as operações que permitiram identificar um ponto pertencente à marca, foram aplicadas funções que apenas funcionam sobre imagens de 2 bits. Desta forma, foi necessário transformar os cortes em imagens binárias (Figura 5.9). Esta tarefa foi realizada através de um comando do Matlab[®].

5.1.5.1.2. Reconstrução das Marcas Fiduciais

A limiarização é a tarefa mais importante do algoritmo de detecção automática de marcas fiduciais. Se esta for realizada incorrectamente, nunca é possível fazer uma boa individualização da marca. É impossível fazer uma limiarização perfeita, que não contenha objectos exteriores à marca. Contudo, se estes não estiverem em contacto com a marca, é possível removê-los da imagem.

Os objectos detectados durante a limiarização e que não pertenciam às marcas fiduciais foram eliminados através da realização de uma erosão binária. A função desta operação é eliminar os pixels pertencentes à fronteira do objecto. Enquanto as dimensões dos objectos diminuem (uma vez que os pixels exteriores são apagados), os buracos existentes no interior destes aumentam. Para realizar a operação é necessário um elemento estruturante, o qual percorre todos os pixels da imagem. No caso de, numa passagem do elemento estruturante, todos os pixels da imagem, aos quais estão sobrepostos os pixels do elemento estruturante, apresentarem o valor 1, o pixel da imagem correspondente à origem do elemento estruturante mantém o valor 1. Se pelo menos um dos referidos pixels não pertencer ao objecto, o pixel correspondente à origem do elemento estruturante passa a apresentar o valor 0 [Fisher *et al*, 2003d].

A realização da erosão faz com que os pixels pertencentes aos vários objectos sejam eliminados. Este fenómeno verifica-se não só nos objectos indesejados, mas também nas marcas fiduciais que se pretendem preservar com este algoritmo. A erosão dos cortes das imagens do RAF47 foi realizada com um elemento estruturante quadrado, com 3 pixels \times 3 pixels, sendo o pixel central a origem do elemento estruturante. Todos os pixels deste elemento apresentam o valor 1. A função do Matlab[®] que foi utilizada para efectuar esta operação permite a escolha do número de vezes que se pretende realizar a erosão com o mesmo elemento estruturante. Foi determinado que a erosão seria realizada apenas uma vez, no entanto, este processo seria repetido durante um número indeterminado de vezes, dependente das características das imagens em cada iteração.

De acordo com Graves e Batchelor (2003), o número de Euler é definido como sendo “o número de componentes conexas (objectos) menos o número de buracos numa imagem binária”. A utilização deste operador morfológico permite a identificação do número de objectos presente numa imagem (no caso de não existirem buracos) ou do número de buracos presente num objecto, no caso de não existirem objectos separados [Graves and Batchelor,

2003]. Esta operação morfológica foi utilizada como guarda do ciclo em que foram feitas as sucessivas erosões das imagens. Aproveitando a função já programada do Matlab[®] que permite conhecer o número de Euler em cada iteração do ciclo, a erosão apenas é interrompida no caso de se verificar uma de duas situações: se o número de Euler for igual a 1 ou se este for igual a 0. No primeiro caso, significa que o número de objectos excede o de buracos em 1 unidade. Um caso particular desta situação é aquele em que existe apenas um objecto e nenhum buraco. Esta é a situação ideal para parar a erosão (Figura 5.10), pois como as dimensões do corte foram escolhidas de forma a garantir que a marca fiducial fosse o maior objecto representado, este é o último objecto a ser “apagado”. Logo, o único objecto ainda presente na imagem quando o número de Euler é 1, pertence à marca fiducial - marcador.



Figura 5.10 – Marcador da marca fiducial: resultado de uma erosão realizada até o número de Euler ser 1.

Com o aumento do número de iterações realizadas, o número de Euler tem tendência a diminuir, em valor absoluto; mas, por vezes, nunca se verifica a situação em que esta variável é igual a 1. Neste caso, existe uma situação limite que foi necessário identificar para forçar o ciclo a parar. Esta situação limite verifica-se quando todos os pixels do objecto foram apagados. Para evitar a ocorrência de ciclos infinitos nesta situação, foi utilizada a segunda guarda do ciclo, que o obriga a parar quando o número de Euler é igual a 0.

A fase do processamento que se segue à erosão necessita de pelo menos um pixel pertencente ao objecto para ser executada. Logo, quando o número de Euler é igual a 0 e a imagem está vazia, as referidas operações não podem ser executadas. Para solucionar este problema, em cada iteração do ciclo onde é feita a erosão, é guardada a imagem obtida no passo anterior. No caso de, depois de efectuada a erosão, o número de Euler ser igual a 0, o

programa recupera a imagem anterior, quando esta variável apresentava um valor diferente e a imagem ainda não se encontrava vazia. A partir deste ponto do algoritmo, todos os passos são efectuados sobre esta imagem recuperada.

Como já foi dito, a limiarização das marcas não produz resultados perfeitos. Frequentemente, as marcas apresentam muitos buracos no seu interior (quando a radiometria destas na imagem original não era muito uniforme) e, por coincidência, ocorrem situações em que o número de Euler é igual a 1 ou a 0 e não se verificam as situações acima descritas (Figura 5.11). Estes casos são problemáticos, uma vez que, frequentemente, continuam representados na imagem alguns objectos exteriores à marca fiducial. Se estes não forem eliminados durante a erosão, não haverá outra forma de os extrair da imagem. Desta forma, estes objectos indesejados irão dificultar a detecção correcta de um ponto pertencente à marca fiducial.



Figura 5.11 – Corte em que o número de Euler é igual a 0, mas a imagem não está vazia.

A partir de um marcador pertencente à marca, é possível reconstruí-la. A reconstrução é efectuada recorrendo a uma outra operação morfológica que também actua sobre imagens binárias: a dilatação. Esta operação é responsável pelo aumento do número de pixels pertencentes ao objecto na zona da fronteira. Ao aplicar a dilatação sobre uma imagem binária, as dimensões do objecto aumentam e as dos buracos diminuem, pois são acrescentados pixels em todas as fronteiras. Para executar esta operação, volta a ser necessário um elemento estruturante. Este elemento percorre, um a um, todos os pixels do fundo da imagem. No caso de pelo menos um pixel do elemento estruturante se encontrar sobre um pixel pertencente ao objecto, o pixel da imagem que tem a origem do elemento estruturante

sobreposta passa a pertencer ao objecto, ou seja, passa a apresentar o valor 1. No caso de nenhum pixel do elemento estruturante estar sobreposto a um pixel do objecto, o pixel da imagem correspondente à origem do elemento estruturante mantém o número digital do fundo. A dilatação pode ser utilizada em conjunção com operações lógicas. Se a dilatação for efectuada várias vezes consecutivas, os pixels acrescentados serão adicionados em toda a fronteira sem qualquer distinção. Para recuperar a forma original do objecto, torna-se necessário intersectar a imagem obtida com qualquer informação proveniente da imagem original, para que o objecto seja expandido na direcção certa [Fisher *et al*, 2003e].

A dilatação dos marcadores das marcas fiduciais foi efectuada com o mesmo elemento estruturante da erosão. Também esta operação foi realizada dentro de um ciclo, tendo este sido executado até ser verificada a sua condição de paragem. Mas se tivesse sido realizada apenas a dilatação em cada iteração, ao fim de algumas passagens, toda a imagem estaria ocupada por pixels pertencentes ao objecto, sendo impossível individualizar a marca fiducial. Desta forma, foi necessário, em cada iteração, intersectar a imagem dilatada com a imagem resultante da limiarização e da binarização. Este processo é repetido até a imagem obtida durante uma passagem ser igual à imagem obtida na iteração anterior – idempotência. A Figura 5.12 mostra uma marca fiducial reconstruída através do algoritmo exposto.



Figura 5.12 – Marca fiducial reconstruída a partir de operações morfológicas.

No entanto, este algoritmo nem sempre conduz a resultados perfeitos. O factor determinante para o sucesso do programa reside na qualidade da limiarização. Como a imagem dilatada é intersectada com a imagem proveniente da limiarização, os pixels pertencentes à marca fiducial apenas são acrescentados, se apresentarem o valor 1 na imagem

limiarizada. Se os pixels necessários não estiverem presentes nesta imagem, durante a reconstrução, estes nunca serão recuperados. No caso de pixels não pertencentes à marca estarem representados na imagem limiarizada, estes podem ser reconstruídos erradamente. Se se verificar a situação ideal em que o ciclo onde é feita a erosão é interrompido quando o número de Euler for igual a 1 e esta situação corresponder ao caso em que existe apenas um objecto na imagem (em princípio pertencente à marca fiducial, uma vez que era o maior objecto inicial e, portanto, o que precisa de mais iterações até ser eliminado), apenas a marca será reconstruída de acordo com a imagem limiarizada. Podem, nesta situação, ser reconstruídos alguns elementos errados, mas isto só acontece se estes se encontrarem em contacto com a marca fiducial. No caso em que estão presentes, na imagem resultante da erosão, mais do que um marcador, durante a dilatação e intersecção com a imagem limiarizada, todos os objectos a que estes correspondem são reconstruídos, quer estejam em contacto com a marca ou não.

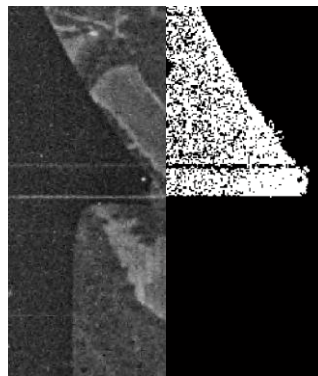


Figura 5.13 – Corte original (esquerda) com problemas e a respectiva reconstrução da marca fiducial (direita).

A Figura 5.13 mostra o exemplo de uma marca fiducial mal reconstruída. Durante a limiarização, como a marca apresentava tons de cinzento semelhantes, à excepção da zona das falhas, ambas as zonas foram identificadas como pertencendo ao objecto. No entanto, como a parte de cima da marca tem uma área superior, durante a erosão apenas ficou um marcador pertencente a esta. Desta forma, durante o processo de reconstrução, a parte de cima da marca foi sofrendo sucessivas dilatações e intersecções com a imagem limiarizada. Dado que não existia “comunicação” entre ambas as partes, a parte de baixo foi considerada como sendo um objecto exterior à marca e não foi reconstruída.

5.1.5.1.3. Identificação de Um Ponto Pertencente À Marca

Depois da reconstrução da marca, foi necessário identificar um ponto do corte que pertencesse a esta e registar as suas coordenadas pixel no sistema de coordenadas pixel associado ao corte. Considerando que as tarefas anteriores foram executadas sem incidentes, cada corte contém um conjunto de pixels aos quais foi atribuído o valor 1, os quais representam a marca fiducial e os restantes pixels, pertencentes ao fundo da imagem, apresentam o valor 0. O objectivo é identificar um pixel que apresente o número digital 1 e que pertença à parte recta da seta. A parte recta da seta apresenta-se em diferentes posições consoante o sentido de voo e a posição da marca na imagem. Por esta razão, o algoritmo teve de ser dividido em dois modos de processamento, um para cada sentido de voo, os quais foram subdivididos em quatro situações – uma para cada marca fiducial.

Para encontrar um ponto pertencente a cada marca fiducial, é necessário percorrer cada um dos cortes. No entanto, não basta encontrar um ponto que apresente o valor 1. É necessário verificar se o ponto pertence realmente à marca e se está situado na zona correcta. A forma de pesquisa de cada uma das marcas é idêntica, mas como estas mudam de posição, a direcção e o sentido da pesquisa também têm de mudar em cada caso. A pesquisa é efectuada ao longo de uma fiada de pixels aproximadamente perpendicular ao segmento de recta que se pretende identificar e as fiadas são percorridas, uma a uma, a partir daquela que se situa mais próxima do centro da imagem original até à margem desta. Os sentidos de progressão da pesquisa estão indicados na Figura 5.14.



Figura 5.14 – Método de pesquisa de pontos pertencentes à marca fiducial.

Como o objectivo do algoritmo é a identificação de um ponto pertencente à parte recta da seta, este pode ser atingido através da detecção de vários pontos pertencentes à marca e da selecção de um de três pontos que estejam o mais próximo possível da colinearidade. Com este propósito em mente, apenas foram pesquisados pontos de dez em dez fiadas e foram registadas as coordenadas pixel, no sistema associado ao corte de todos os primeiros pontos encontrados com número digital igual a 1, para cada fiada pesquisada. Para cada trio de pontos consecutivos foram definidos vectores com origem no ponto central e orientados para cada um dos outros dois pontos. Recorrendo aos dois vectores, \vec{F} e \vec{P} , foi determinado o seu produto interno e, posteriormente, o ângulo (α) entre estes, através da fórmula:

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\vec{F} \cdot \vec{P}}{\|\vec{F}\| \|\vec{P}\|} \right).$$

Após a obtenção de todos os ângulos entre trios de pontos consecutivos, os valores adquiridos foram comparados com o valor 180° e foi seleccionado um dos pontos pertencente ao trio que definia o ângulo mais próximo do valor mencionado. Na maioria dos casos, o ponto seleccionado foi o ponto central do trio. As excepções foram as situações em que apenas foi encontrado um ponto em toda a imagem, caso em que esse ponto foi o escolhido, ou aquelas em que foram encontrados dois pontos, em que foi escolhido o segundo. Esta última escolha foi baseada na solução que se verificou conduzir a resultados mais favoráveis.

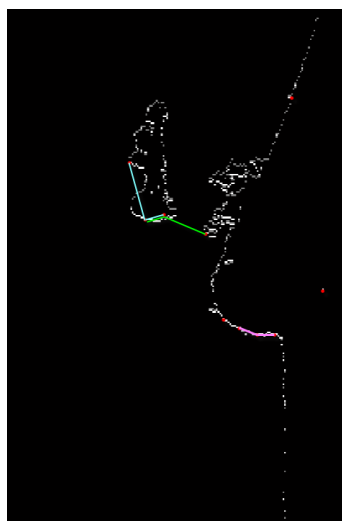


Figura 5.15 – Pontos detectados pelo algoritmo (vermelho) e vectores definidos por trios de pontos.

Na Figura 5.15, está representado o contorno de uma marca fiducial que contém algumas das situações mais problemáticas enfrentadas pelo programa. Esta, para além de apresentar um objecto exterior à marca (a imagem resultante da erosão continha dois marcadores), a parte da marca que se pretendia identificar estava longe de ser rectilínea. O algoritmo de pesquisa de pontos identificou dez pixeis com as características desejadas, representados na imagem como pontos vermelhos. Após calculados todos os ângulos entre trios de pontos consecutivos (apesar de na figura estarem representados apenas três conjuntos), o trio identificado pelo par de vectores representado a rosa foi considerado como sendo o mais próximo de 180° , tendo sido seleccionado, correctamente, o ponto central para ser utilizado no cálculo dos Parâmetros de Transformação Afim.

5.1.5.1.4. Controlo de Qualidade dos Pontos Encontrados

Como já foi dito várias vezes ao longo deste texto, não existem algoritmos perfeitos. Os pontos seleccionados para serem utilizados no cálculo dos Parâmetros de Transformação Afim foram sujeitos a alguns procedimentos de controlo de qualidade. Os critérios utilizados para verificação foram obtidos empiricamente. Ao processar várias imagens com o algoritmo acima exposto, verificou-se que algumas marcas fiduciais não eram detectadas ou não o eram correctamente. Como algumas das situações aconteciam em várias imagens, foram detectados problemas comuns e foram introduzidas, ao longo do código, determinadas condições que permitiram ao programa a identificação destas situações problemáticas e a sua resolução. Algumas das correcções foram feitas na rotina de detecção automática das marcas, enquanto outras tiveram de ser redireccionadas para o programa principal: ORIRAF47.

Um dos exemplos de controlo de qualidade efectuados na rotina de detecção das marcas (*lerzooms17*) é a verificação do ângulo entre os vectores definidos por trios de pontos consecutivos. Experiências efectuadas em várias imagens, mostraram que este ângulo nunca deverá ser superior a 20° . No decorrer da rotina *lerzooms17*, de todos os ângulos calculados é escolhido o menor e é verificado se esse ângulo é menor que 20° . Se esta condição não se verificar, a imagem é imediatamente rejeitada e a sua Orientação Interna apenas pode ser feita manualmente. Se o ângulo for menor que 20° , mas o ponto escolhido for rejeitado nouro ponto do controlo de qualidade, é seleccionado o trio de pontos com o segundo menor ângulo entre os vectores definidos por estes. Este processo é repetido até não existirem ângulos menores que 20° ou ser encontrado um ponto que satisfaça todas as condições.

Verificou-se, para cada corte, que o segmento de recta que se pretendia identificar era, aproximadamente, paralelo a duas das margens do corte. Os testes efectuados mostraram que o ângulo entre o segmento e o bordo da imagem, para permitir a detecção de um ponto correcto, deve ser inferior a 20° . Se esta condição não for verificada, o ponto que tinha sido seleccionado é rejeitado e é iniciada a busca por um novo trio de pontos para seleccionar um novo. Os vectores utilizados no cálculo do ângulo mencionado são os vectores definidos pelo primeiro e segundo pontos do trio (mas também poderia ter sido utilizado o outro par de pontos) e o vector unitário da margem do corte que se encontra mais perto de ser paralelo ao segmento de recta que se pretende identificar.

Em várias fases do programa, é possível rejeitar a imagem, forçando-a a ser orientada manualmente. É o que acontece se quando são procurados os pontos de dez em dez fiadas de pixels, não for encontrado nenhum ponto com número digital igual a 1 ou no caso de o número de Euler da imagem limiarizada e binarizada ser igual a 0, antes da aplicação das operações morfológicas. A imagem também é rejeitada quando todos os pontos seleccionados pertencem a vectores que fazem ângulos superiores a 20° com o bordo da imagem ou quando todos os ângulos definidos pelos trios de pontos são superiores a 20° .

Existe, ainda, uma situação em que a imagem é rejeitada no programa principal. A condição que permite decidir a rejeição ou não da imagem é determinada depois de as quatro marcas fiduciais terem sido detectadas e as suas coordenadas convertidas para o sistema de coordenadas pixel da imagem completa. As referidas coordenadas são utilizadas para calcular os Parâmetros de Transformação Afim. As experiências efectuadas mostraram que, para a maioria das imagens, se a diferença entre um ângulo recto e o ângulo formado pelos eixos dos xx e dos yy do sistema de coordenadas foto for superior a $0,5^\circ$; a imagem deve ser rejeitada.

Quando os pontos detectados satisfizerem todas as condições acima mencionadas, os Parâmetros de Transformação Afim calculados através destes são considerados como aceitáveis. As imagens em que as marcas fiduciais não foram detectadas automaticamente, ou seja, as imagens que foram rejeitadas, foram orientadas de forma manual.

5.1.5.2. Análise dos Resultados Obtidos na Detecção Automática das Marcas Fiduciais

O cálculo dos Parâmetros de Transformação Afim através do programa ORIRAF47 foi dividido em duas partes: uma para cada sentido das fiadas de voo. Após a selecção

adequada de cada conjunto de imagens, estas foram processadas automaticamente, tendo sido despendidos 63 minutos para processar as 169 imagens consideradas neste projecto.

Para além de algumas imagens terem sido rejeitadas durante a execução do programa, devido aos testes de controlo de qualidade a que os pontos encontrados foram sujeitos; as imagens aceites também foram cuidadosamente verificadas, uma a uma, para confirmar se os pontos atribuídos às marcas fiduciais se encontravam correctos. Automaticamente, foram determinados os Parâmetros de Transformação Afim de 91 imagens, tendo sido rejeitadas 78. Do conjunto de imagens rejeitadas, algumas foram rejeitadas porque pelo menos uma das marcas fiduciais não foi detectada, ou seja, nenhum dos pontos detectados no respectivo corte foi aceite; enquanto outras foram rejeitadas porque os eixos do sistema de coordenadas foto estavam demasiado longe da ortogonalidade. O programa ORIRAF47, na versão modificada no decorrer deste projecto para adaptação à versão automática, indica no ficheiro gerado quando a imagem é rejeitada, qual das duas razões levou à rejeição da imagem. A Figura 5.16 mostra um gráfico onde estão indicados os resultados estatísticos do controlo de qualidade efectuado.

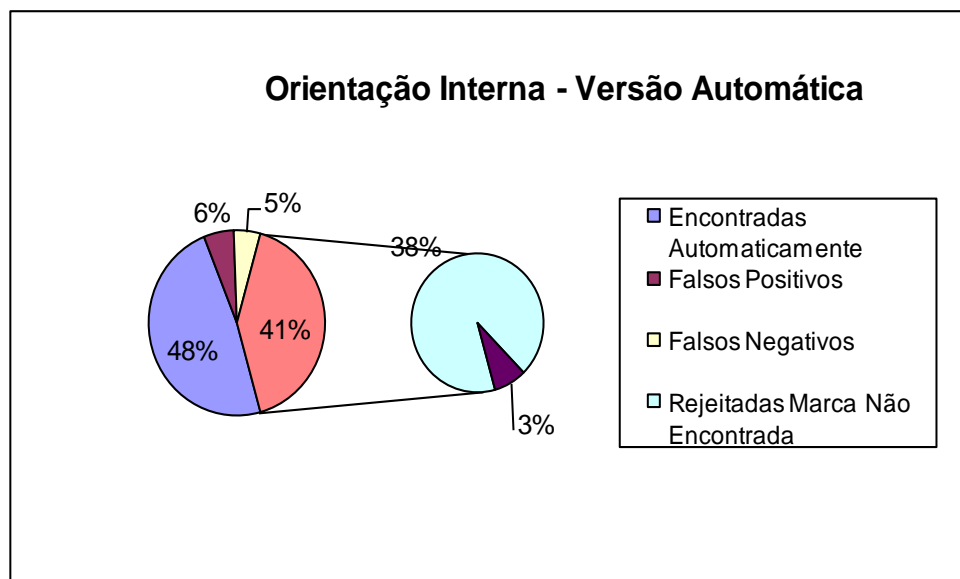


Figura 5.16 – Gráfico com os dados estatísticos do controlo de qualidade efectuado ao programa de detecção automática das marcas fiduciais.

Do conjunto de imagens que foram processadas, os Parâmetros de Transformação Afim foram determinados com sucesso, automaticamente, em 48% destas. Neste grupo de imagens, em todas as quatro marcas, o ponto detectado pertencia, realmente, à parte recta da

marca fiducial. A exactidão dos testes efectuados para controlo de qualidade foi de 89%, ou seja, 89% das imagens foram classificadas correctamente (orientadas ou rejeitadas). No entanto, 6% das imagens consideradas foram classificadas como tendo sido orientadas automaticamente, quando, afinal, pelo menos uma das marcas fiduciais havia sido mal detectada. Não foi encontrado nenhum padrão nestas imagens, de forma a permitir o acréscimo de mais condições de controlo de qualidade ao algoritmo, a fim de prevenir estas situações. A Orientação Interna destas imagens foi realizada manualmente, para garantir a inexistência de futuros problemas durante a triangulação. Para além deste conjunto de falsos positivos, verificou-se também a ocorrência de falsos negativos, num total de 5% das imagens, isto é, apesar de as imagens terem sido rejeitadas, afinal estas possuíam as marcas fiduciais bem determinadas. A existência de falsos positivos é mais grave do que a de falsos negativos. A única consequência da existência destes últimos é a necessidade de fazer a Orientação Interna manualmente para algumas das imagens quando esta já estava correctamente determinada. No entanto, esta tarefa não é muito morosa, pois apenas uma pequena percentagem das imagens foi afectada por este problema. Contudo, a presença de falsos positivos pode ser mais problemática, uma vez que não é possível detectá-los sem verificar as quatro marcas de todas as imagens uma a uma e não existe qualquer forma de os detectar automaticamente. A preditividade positiva dos testes de controlo de qualidade (proporção entre o número de imagens orientadas correctamente de forma automática e o número total de imagens orientadas automaticamente) é de cerca de 90%, ou seja, os testes efectuados durante a detecção das marcas fiduciais garantem que 90% das imagens orientadas automaticamente estão correctas [Sabbatini, 1995]. Quanto aos 10% restantes, não existe forma de contornar este problema.

Durante a verificação dos resultados, observou-se que, em todas as imagens rejeitadas, apenas uma das marcas não foi detectada automaticamente de forma correcta. Apesar de só 48% das imagens terem sido orientadas correctamente, a percentagem de marcas fiduciais que foram detectadas automaticamente, com sucesso, foi de 85%.

Dos 41% de imagens que foram rejeitadas, a maioria destas não foi aceite porque uma das marcas não foi encontrada e apenas uma pequena quantidade foi rejeitada porque o ponto detectado não pertencia à marca fiducial. Este segundo tipo de rejeição é devido, principalmente, à reconstrução de objectos exteriores à marca fiducial. A razão que leva ao primeiro tipo de erro está relacionada com a reconstrução de forma errada da marca fiducial, que tem origem na limiarização da imagem. Portanto, o maior problema do algoritmo de detecção automática de marcas fiduciais é a qualidade da limiarização.

5.2. Triangulação Automática

Para a realização de uma aerotriangulação por feixes perspectivos, como a que foi realizada no âmbito deste trabalho, é extremamente importante a utilização de pontos de apoio. De acordo com Redweik (2007), estes são pontos visíveis em pelo menos duas fotografias e que são utilizados para fazer a ligação entre fotos e modelos e, ainda, para ligar as imagens ao terreno. Os pontos de apoio podem ser divididos em três conjuntos distintos: pontos fotogramétricos, pontos de passagem e pontos de ligação. Os pontos fotogramétricos serão tratados no subcapítulo seguinte. Quanto aos pontos de passagem e aos pontos de ligação, estes são destinados a ser medidos em todas as imagens em que são visíveis, sendo registadas apenas as suas coordenadas foto. Só durante a aerotriangulação é que as suas coordenadas terreno são calculadas. Os pontos de passagem são responsáveis por efectuar a ligação entre modelos, enquanto os pontos de ligação relacionam as fiadas sobrepostas. Para que um modelo fique correctamente orientado, são necessários, no mínimo, seis pontos, enquanto para orientar uma fotografia devem ser utilizados nove [Redweik, 2007].

Para projectos que envolvem um elevado número de imagens, e conseqüentemente de modelos, a medição manual de seis pontos em cada modelo é uma tarefa monótona e demorada. Felizmente, os programas actuais de aerotriangulação incluem a possibilidade de realizar triangulações automáticas. Estas rotinas recorrem a técnicas de processamento digital de imagem para simplificar as fotografias e para detectar pontos comuns – pontos homólogos. Cada programa de aerotriangulação tem um algoritmo de triangulação automática diferente. De seguida, serão expostos os princípios nos quais se fundamenta o algoritmo utilizado pelo ISAT[®].

Antes de iniciar o processo de triangulação automática, foi indispensável criar, para cada uma das 169 imagens trabalhadas, estruturas denominadas por *overviews*. Estas estruturas correspondem a simplificações das imagens e são análogas aos diferentes níveis de altura de uma pirâmide. O primeiro nível da pirâmide, ou seja, a primeira *overview* corresponde à imagem original, a qual apresenta um pixel de 21 μm . O segundo nível da pirâmide consiste numa imagem que contém apenas $\frac{1}{4}$ do número de pixels da imagem original, uma vez que cada pixel da nova imagem é originado a partir de um conjunto de quatro pixels da primeira.

Antes de diminuir a resolução da imagem para metade, é aplicado ao nível da pirâmide que está a ser trabalhado, um filtro gaussiano [Owens, 1997]. Este filtro tem em

conta o desvio padrão σ dos valores de cinzento que se situam numa zona da imagem com dimensões correspondentes às da janela do filtro – *kernel*. O número digital do pixel $G(x,y)$ na imagem resultante é calculado através da fórmula

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

onde x e y são as coordenadas do pixel a transformar. Na prática, a fórmula anterior é utilizada para definir os valores das entradas de uma matriz que percorre a imagem, sendo feita a multiplicação entre os valores da imagem e os coeficientes do *kernel* correspondentes, os quais depois são adicionados para obter o novo valor de cinzento. No filtro gaussiano, é utilizada uma média ponderada, tendo em conta as propriedades de uma distribuição normal, como por exemplo a simetria. Os pixels mais próximos do centro do *kernel* são os que apresentam coeficientes mais elevados [Fisher *et al.*, 2003g].

O processo de construção das *overviews* é repetido, utilizando a segunda *overview* como dado de entrada. Para cada uma das imagens foram criados 8 níveis da pirâmide, dando origem a um total de 9 *overviews*. Como os valores de cinzento de cada pixel foram obtidos através de simplificações sucessivas e as imagens continham muitos problemas radiométricos, sendo ainda visíveis algumas diferenças entre imagens mesmo após o tratamento, os níveis superiores das pirâmides de duas imagens consecutivas apresentavam valores de cinzento muito diferentes, mesmo para os pixels correspondentes. A fim de evitar a detecção de pontos homólogos errados durante a triangulação automática, os três níveis superiores das pirâmides não foram utilizados. Desta forma, apenas foram usadas 6 *overviews*. Cada pixel da imagem do nível superior da pirâmide tinha 672 μm de lado (Figura 5.17).

O algoritmo de triangulação automática utilizado pelo ISAT[®] recorre a duas técnicas de correlação de imagens: correlação baseada em objectos (*feature-based matching*) e correlação pelos mínimos quadrados (*least-squares matching*) [Wang and Madani].

A correlação baseada em objectos não necessita que as aproximações iniciais da localização dos pontos estejam muito próximas da realidade. Numa primeira fase do algoritmo, as imagens são pesquisadas a fim de identificar quais as estruturas que se mantêm estáveis com a mudança de ponto de vista, ou seja, as que apresentam poucas alterações em imagens diferentes. No ISAT[®], o operador que é utilizado para realizar esta pesquisa é o operador de Förstner. Este identifica pontos homólogos nas imagens através da análise da variação dos valores de cinzento na vizinhança dos pontos [Owens, 1997; Wang and Madani].

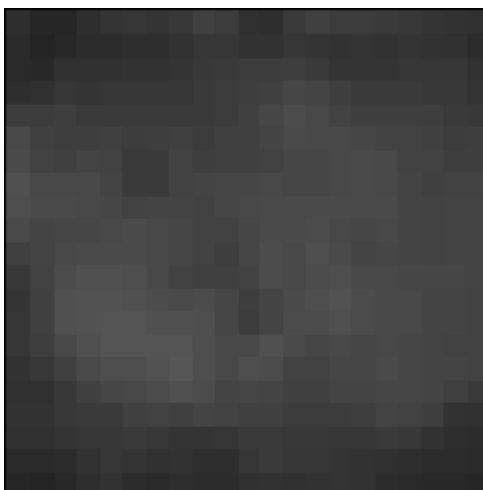


Figura 5.17 – Imagem do nível superior de uma pirâmide.

A correlação pelos mínimos quadrados é um método de correlação de imagens utilizado apenas para refinamento, uma vez que, para que o algoritmo funcione, as aproximações iniciais para a localização dos pontos têm de ter bastante exactidão. Este género de correlação é baseado na modelação da correspondência geométrica e radiométrica entre dois fragmentos das imagens. A modelação geométrica é definida através de uma transformação afim, consistindo na determinação de 6 parâmetros: duas translações e as quatro entradas da matriz de rotação multiplicadas por um ou dois factores de escala. A modelação radiométrica é definida através de dois parâmetros – contraste k_1 e brilho k_2 . Para cada um dos pontos detectado durante a correlação baseada em objectos (a qual normalmente é feita antes da correlação por mínimos quadrados), é possível escrever três equações:

$$\begin{aligned}x' &= a_1x + a_2y + a_3 \\ y' &= b_1x + b_2y + b_3 \\ g(x,y) &= k_1h(x',y') + k_2\end{aligned}$$

onde x' e y' são as coordenadas pixel do ponto na imagem da direita, x e y são as coordenadas deste na imagem da esquerda, a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 e b_3 são os parâmetros de transformação afim, $g(x,y)$ é o valor de cinzento do ponto na imagem da esquerda e $h(x',y')$ é o valor de cinzento do mesmo ponto na imagem da direita. Utilizando aproximações iniciais adequadas para os 8 parâmetros a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 , b_3 , k_1 e k_2 , é possível efectuar um ajustamento pelo método dos mínimos quadrados e obter valores corrigidos para os parâmetros referidos. Estes valores são

aplicados à imagem da direita, a qual vai sofrendo sucessivas transformações até se encontrar alinhada com a da esquerda. Se as aproximações iniciais dos parâmetros forem muito distantes da realidade, o algoritmo não converge [Bethel, 1997].

No caso particular do ISAT[®], é exigido ao utilizador que, para além das imagens, sejam introduzidas as aproximações iniciais dos parâmetros de orientação externa de cada fotografia e, ainda, que sejam criadas as pirâmides das imagens. O algoritmo de triangulação automática aplica a correlação baseada em objectos no nível da pirâmide com menor resolução, para todas as imagens, seleccionando, desta forma, um conjunto de pontos que em princípio serão homólogos. Esses pontos detectados são os dados de entrada para a realização da correlação pelos mínimos quadrados, que, no caso de o algoritmo convergir, transforma uma das imagens para que as fotografias adjacentes fiquem orientadas relativamente (de forma muito aproximada). Tendo como referência os pontos detectados, são procurados pontos homólogos nos níveis inferiores da pirâmide. No entanto, como no trabalho desenvolvido foram utilizadas apenas 6 níveis da pirâmide, a correlação pelos mínimos quadrados não foi realizada logo no primeiro nível, mas apenas num nível intermédio, onde cada pixel tinha 84 μm de lado. Também neste nível da pirâmide são calculadas correcções aos parâmetros de orientação externa introduzidos inicialmente e é criado um Modelo Digital do Terreno aproximado. Este Modelo Digital do Terreno é utilizado para aumentar a velocidade de processamento e para diminuir a probabilidade de ocorrência de erros nos níveis mais baixos da pirâmide. Muitas vezes, quando é cometido algum erro antes de realizar a triangulação automática, como por exemplo realizar a orientação interna das imagens incorrectamente, ao fazer a correlação pelos mínimos quadrados no nível dos 84 μm , o algoritmo não converge, dando origem a uma mensagem de erro e impossibilitando a continuação do processamento. Se o algoritmo convergir, a partir dos pontos encontrados neste nível intermédio da pirâmide, são encontrados outros nos níveis inferiores desta. Uma nova correlação pelos mínimos quadrados é efectuada no nível inferior da pirâmide (a imagem original) a partir dos pontos detectados nos níveis anteriores. Neste último nível, é realizado um novo ajustamento, no qual são calculadas novas correcções aos parâmetros de orientação externa [Wang and Madani].

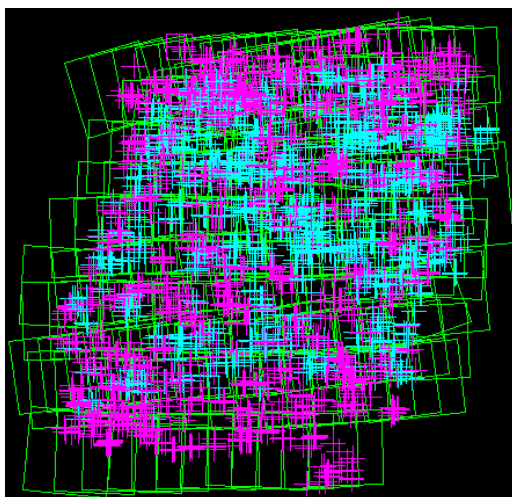


Figura 5.18 – Distribuição dos pontos de passagem (rosa) e dos pontos de ligação (azuis) na área de trabalho.

No caso do trabalho realizado, a triangulação automática demorou 2 horas e 24 minutos a ser executada, tendo sido encontrados 6331 pontos homólogos (Figura 5.18). A precisão obtida para as coordenadas foto durante esta tarefa foi de 528,3 μm , o que corresponde a 15,85 m no terreno. Este valor é demasiado elevado, podendo ser explicado pelas diferenças radiométricas entre as imagens, que mesmo depois do tratamento, apesar de menos significativas, continuam a ser visíveis e pela indefinição dos objectos representados, causada pelas elevadas distorções radiais e tangenciais das lentes utilizadas e pela fraca resolução das imagens. As razões expostas dificultam a aplicação da correlação baseada em objectos, a qual está direccionada para a detecção de estruturas, como por exemplo esquinas de edifícios (Figura 5.19).



Figura 5.19 – Conjunto de edifícios onde não são visíveis as estruturas normalmente identificadas pelo algoritmo de detecção de pontos homólogos (IGeoE).

Para além dos pontos homólogos, foram detectadas 156 áreas pobres. Para assegurar a qualidade do bloco formado pelas fotografias, o ISAT[®] divide cada uma destas em 9 zonas com a mesma área – as áreas de von Gruber. Para que o bloco seja suficientemente robusto, é necessário que em todas as imagens existam pontos homólogos nestas 9 áreas. Uma destas áreas é definida como área pobre no caso de os pontos que estão presentes nela não fornecerem uma solução suficientemente exacta (com base nos resíduos dos pontos e no número de pontos da área com um elevado número de raios, ou seja, pontos que são visíveis num elevado número de fotografias). Esta situação verifica-se, principalmente, em zonas da imagem com radiometria muito homogénea [Dörstel *et al.*, 2001]. A maioria das áreas pobres detectadas no projecto situavam-se em água, razão pela qual todas elas foram apagadas.

Apesar de a triangulação automática ter sido realizada sobre as 169 imagens consideradas no projecto, apenas 166 foram trianguladas. As imagens situadas nos extremos da fiada mais a Sul (uma a Oeste e duas a Este) foram rejeitadas durante o processamento, não tendo sido possível voltar a utilizá-las durante o projecto. Analisando as três imagens, observou-se que bastante mais de metade da área das fotografias se encontrava coberta por água (Figura 5.20), sendo, provavelmente, esta a razão pela qual não foram encontrados pontos homólogos suficientes nestas.

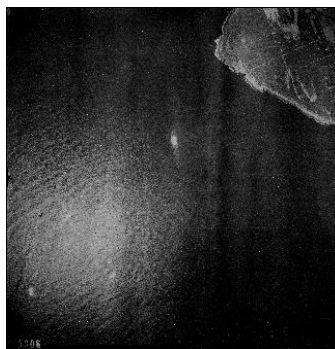


Figura 5.20 – Miniatura de uma das fotografias rejeitadas durante a triangulação automática (IGeoE).

5.3. Pontos Fotogramétricos

De acordo com Wolf (1974), os pontos fotogramétricos são todos aqueles cujas coordenadas num determinado sistema de coordenadas objecto são conhecidas e podem ser identificados nas fotografias. Através dos pontos fotogramétricos é possível orientar as

fotografias aéreas em relação ao terreno. Se o bloco formado pelas fotografias consideradas num projecto apresentar uma geometria estável, ou seja, se os pontos homólogos forem em número suficiente e com a qualidade requerida, para orientar a cobertura aerofotográfica relativamente ao terreno, basta utilizar pontos fotogramétricos em determinadas zonas do bloco. A distribuição mais comum para os pontos fotogramétricos consiste na utilização de PFs duplos nos cantos do bloco, um PF de 3 em 3 modelos ao longo da primeira e última fiadas e em todas as zonas de sobreposição lateral. Todos os PFs situados nas margens do bloco devem ser completos, ou seja, devem ser conhecidas as suas coordenadas planimétricas e altimétricas, enquanto que os PFs localizados no interior do bloco podem ser apenas altimétricos [Redweik, 2007; Wolf, 1974].

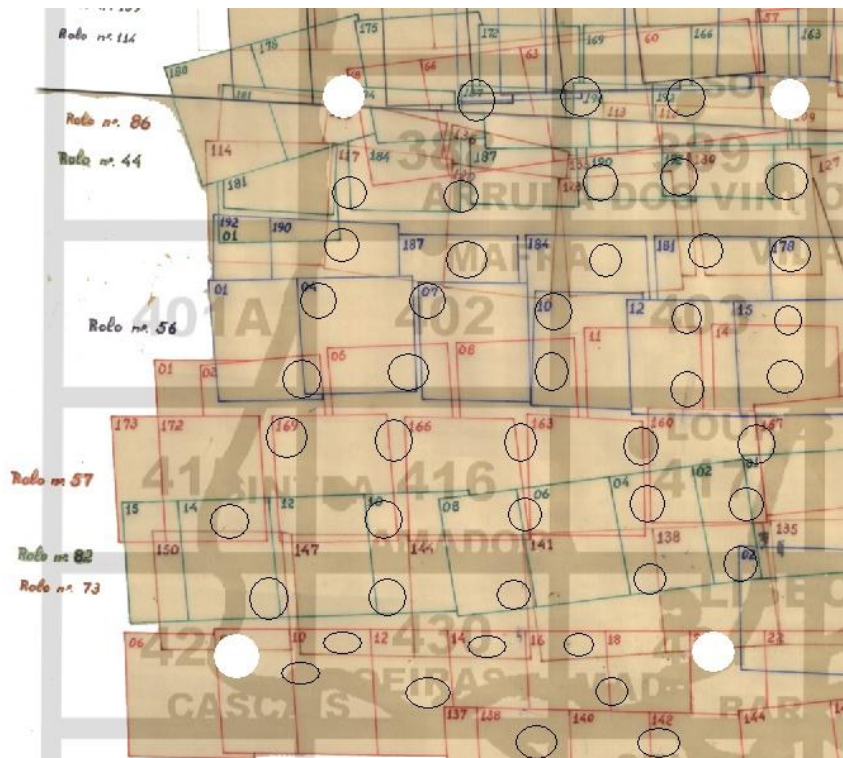


Figura 5.21 – Planeamento da distribuição dos PFs no bloco.

Com base nas regras normalmente utilizadas para a localização dos PFs, foi efectuado um planeamento das zonas da área de trabalho onde, aproximadamente, estes se deveriam situar (Figura 5.21). Na figura apresentada em cima, os círculos brancos representam as áreas onde se deveriam situar os PFs duplos (dois PFs de localizações próximas) e as circunferências a preto mostram a localização prevista para os PFs simples. Se tivesse sido possível cumprir rigorosamente o planeado, teriam sido utilizados 54 PFs no total.

Uma das decisões mais importantes para a realização de uma aerotriangulação é a forma de aquisição das coordenadas terreno dos PFs. Os resultados obtidos na triangulação estão directamente dependentes da precisão dos PFs, uma vez que a precisão dos primeiros nunca ultrapassa a dos segundos [Wolf, 1974]. Actualmente, as coordenadas terreno dos PFs são adquiridas através de campanhas topográficas, onde os pontos seleccionados são coordenados através de GPS. Trata-se de uma operação dispendiosa, que envolve não só os custos do material e as remunerações dos elementos da equipa topográfica, mas também as despesas referentes à deslocação, como combustível, desgaste dos veículos, alimentação, alojamento (quando necessário), entre outras. Para além do elevado encargo económico, a coordenação de pontos no campo apresenta outra desvantagem, no caso particular do RAF47. Dado que as fotografias foram adquiridas há mais de 60 anos e que a zona escolhida para teste é uma das que sofreu mais alterações ao nível da utilização do solo nas últimas décadas, a tarefa de encontrar pontos comuns entre as fotografias e o terreno actual torna-se muito complexa. A Figura 5.22 mostra duas imagens da mesma zona geográfica, onde a da esquerda data de 1947 (IGeoE) e a da direita é actual (Google Maps™).



Figura 5.22 – Alterações na ocupação do solo entre 1947 (esquerda) e 2009 (direita).

Nos arquivos do IGeoE ainda se encontram antigos cadernos de campo, os quais contêm croquis e coordenadas de pontos que foram obtidos para serem utilizados como pontos fotogramétricos aquando da elaboração da primeira edição da carta 1:25000. Estes cadernos encontram-se organizados por folha, existindo, nalguns casos, cadernos de datas diferentes para uma única folha. A preservação destes cadernos foi de grande importância para a realização deste projecto, uma vez que a existência de registos de observações feitas nas décadas de 40 e 50 do século passado permitiu aceder a informação sobre a ocupação do terreno na época em que as fotografias foram obtidas. Os pontos documentados nos referidos

cadernos foram coordenados através da utilização de teodolitos e todos apresentam as suas coordenadas planimétricas e altimétricas. Não existe qualquer informação relativa à precisão com que estas coordenadas foram obtidas, mas o facto de terem sido adquiridas em datas diferentes implica que a sua precisão pode ser variável. Como para algumas das folhas trabalhadas não existiam cadernos de PFs, e a fim de adensar o conjunto de pontos disponível, foram utilizadas também as coordenadas de vértices geodésicos e de vértices auxiliares de sinalização permanente. Para cada uma das folhas trabalhadas no projecto foi construída uma base de dados geográfica em ArcGIS®, onde a localização de todos os pontos disponíveis foi comparada com as zonas onde se previa a necessidade de utilização de PFs (Figura 5.23).

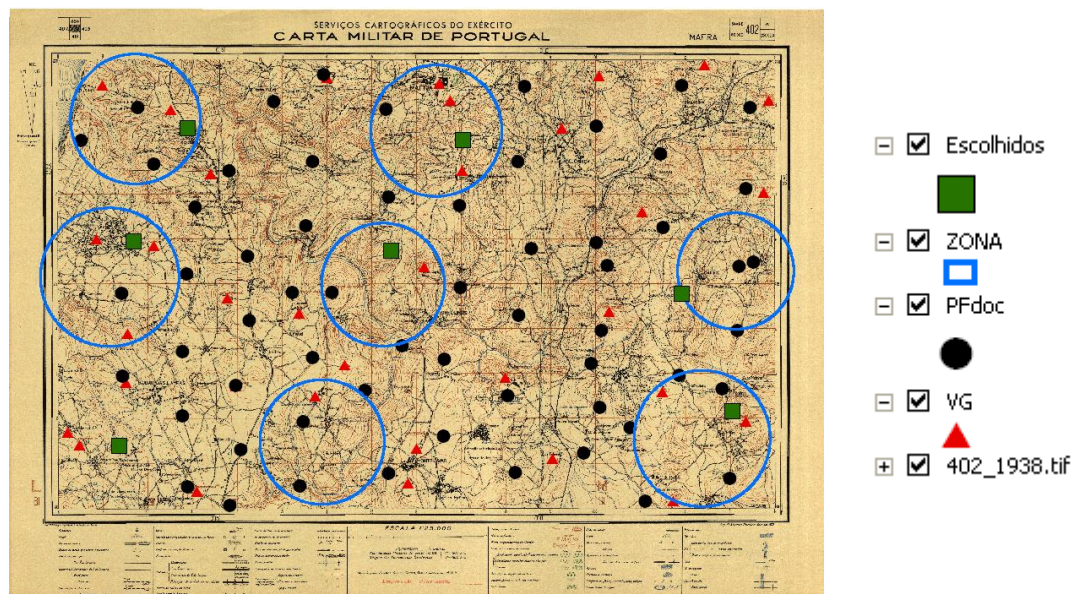


Figura 5.23 – Base de dados geográfica com a localização dos pontos fotogramétricos e respectiva legenda.

A referida base de dados geográfica foi construída sobre as folhas da primeira edição da carta 1:25000. A maioria das folhas utilizadas nesta tarefa foi obtida na década de 30 do século XX, sendo a mais antiga datada de 1928 e a mais “recente” de 1946. Desta forma, as folhas utilizadas apresentam mais semelhanças com as fotografias do voo RAF47 do que as actuais, o que facilitou o processo de pesquisa de pontos. A tabela de atributos da base de dados geográfica, para além das coordenadas de cada ponto seleccionado, contém a sua descrição, data de aquisição, a lista de todas as imagens em que este era visível e um pequeno excerto de uma das fotografias com a sua localização. A organização destas informações

facilitou imenso a aquisição das coordenadas foto dos PFs, pois permitiu tornar mais rápida a sua localização.

A selecção dos PFs foi um processo demorado e monótono. Através da base de dados geográfica mencionada, foram seleccionados todos os pontos localizados no interior das zonas definidas para a localização dos PFs. Recorrendo ao enquadramento das imagens já existente, foram escolhidas todas as fotografias nas quais havia possibilidade de os pontos anteriores serem visíveis. Realizando a comparação entre as fotografias e as folhas, foi possível identificar as zonas aproximadas da localização dos PFs. Os croquis e as respectivas descrições presentes nos cadernos facilitaram a identificação correcta dos pontos. A fraca resolução das imagens e os problemas radiométricos, ainda mais acentuados pelo facto da pesquisa ter sido efectuada nas imagens originais, uma vez que esta tarefa foi realizada simultaneamente com o tratamento das imagens, dificultaram bastante o processo. Notou-se uma grande dificuldade em localizar com precisão torres de igrejas, casas, bolembreanas, entre outros, enquanto os mais fáceis de encontrar foram os moinhos e cruzamentos de eixos de caminhos. Assim que um dos pontos era identificado numa das imagens, todas as outras imagens, que apresentavam zonas de sobreposição com a primeira, eram pesquisadas para verificar em quais delas o ponto estava presente e se este era identificável com suficiente rigor em todas as imagens. Devido aos já mencionados problemas radiométricos das fotografias, foi necessário seleccionar alguns pontos fora das zonas desejadas, uma vez que os pontos localizados no seu interior não satisfaziam os requisitos expostos; e nalgumas não foram encontrados quaisquer pontos que pudessem ser utilizados.

Dos 54 pontos previstos inicialmente, foi possível encontrar 47 PFs pelo método exposto. Durante a realização da triangulação aérea, verificou-se que os pontos fotogramétricos considerados não eram suficientes. Como os 47 pontos iniciais permitiram uma ligeira melhoria dos valores iniciais dos parâmetros de orientação externa, utilizando as funcionalidades do ISAT[®], foi possível identificar, com maior facilidade do que pelo método anterior, um maior número de pontos fotogramétricos, uma vez que o programa assinalava a localização dos pontos cujas coordenadas terreno foram introduzidas. No total, foram registados 75 pontos (antigos pontos fotogramétricos, vértices geodésicos e vértices auxiliares de sinalização permanente), dos quais 61 foram utilizados como pontos fotogramétricos (Figura 5.24) e 14 como pontos de verificação.

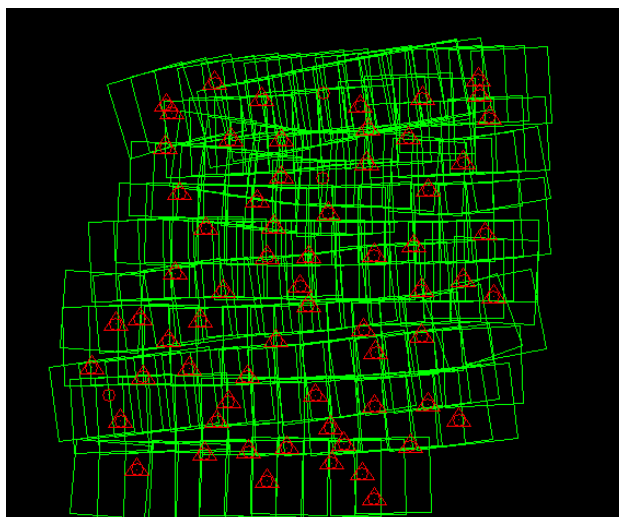


Figura 5.24 – Distribuição final dos PFs no bloco.

Dos 61 pontos fotogramétricos, três foram utilizados apenas como PFs altimétricos, enquanto os restantes foram usados como PFs completos.

Apesar da cuidada selecção a que a escolha dos pontos foi sujeita, a menor densidade de pontos antigos em determinadas zonas (as folhas 417 e 429 foram particularmente complicadas) obrigaram a que tivessem de ser utilizados alguns pontos cuja localização nas imagens não era perfeitamente clara. Foram diversas as situações em que este problema se verificou, tendo sido os vértices geodésicos Guia (Figura 5.25) e Estrela os casos mais marcantes devido à sua localização em zonas estratégicas do bloco e a qualidade muito discutível das imagens em que estes estavam representados. Não foi possível efectuar medições precisas das coordenadas foto destes pontos.

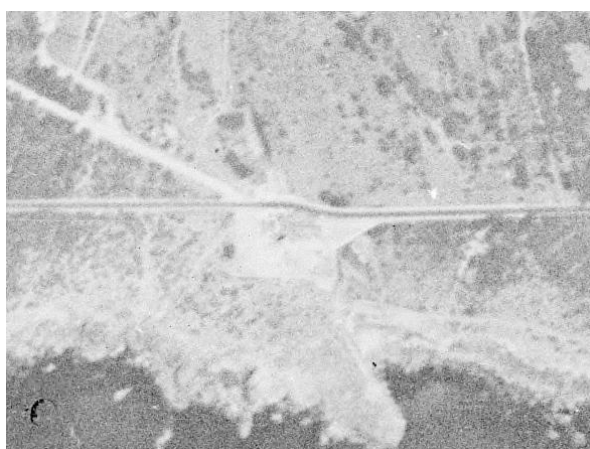


Figura 5.25 – Vértice geodésico Guia, o qual foi utilizado como ponto fotogramétrico (IGeoE).

Como foi mencionado no início deste texto dedicado aos pontos fotogramétricos, os PFs utilizados foram obtidos em datas diferentes, o que levantou uma questão de extrema importância: será que todos os pontos foram registados no mesmo sistema de coordenadas? A única informação fidedigna relativa a este tópico que houve possibilidade de obter foi que a projecção utilizada foi a projecção de Gauss. A Tabela 5.2 apresenta, para cada folha, as datas de observação dos respectivos PFs.

Tabela 5.2 – Datas dos cadernos dos vértices geodésicos, vértices auxiliares de sinalização permanente e pontos fotogramétricos, para cada folha.

Folha	Datas VG e VASP	Datas PF
388	1987	1987
389	1987	1960
401A	1987	-
402	1987	1957
403	1958	1957
415	1988	1966
416	1988	1988
417	1988	1957/1988
429	1988	-
430	1988	1942/1952/1966
431	1988	1944/1988

Ao longo das décadas, a rede geodésica nacional foi sendo alvo de reajustamentos e as coordenadas dos pontos que a constituem foram sendo determinadas com uma precisão cada vez maior. Como consequência, pontos fotogramétricos observados em datas diferentes foram coordenados relativamente a redes diferentes.

As coordenadas utilizadas como referência foram as coordenadas Hayford-Gauss *Datum* Lisboa Militares dos vértices geodésicos de 1987 e 1988. Foi efectuado um estudo das diferenças entre as coordenadas catalogadas dos pontos fotogramétricos e as coordenadas que estes apresentariam se tivessem sido observados relativamente à rede de 1988. Este estudo foi efectuado de uma forma expedita, uma vez que não existem os dados necessários para efectuar uma análise mais rigorosa. Devido ao facto da área estudada ser uma área relativamente pequena, foi considerado que a relação entre coordenadas de diferentes datas era linear. Para cada conjunto de pontos fotogramétricos obtido numa data distinta, foram implantados na folha correspondente todos os vértices geodésicos catalogados, utilizando o ArcGIS[®]. Recorrendo às ferramentas do programa, foram determinadas as coordenadas planimétricas dos vértices geodésicos representados na carta. Estas diferem das coordenadas

implantadas, uma vez que as folhas também foram produzidas em datas diferentes e, como tal, também são referentes a redes diferentes. Foram calculadas as diferenças entre as coordenadas dos vértices geodésicos catalogados e as dos observados, tendo sido efectuada uma média destes valores. Determinou-se a diferença entre esta média e cada uma das diferenças mencionadas e foi feita uma análise aos resíduos obtidos desta forma, tendo sido eliminadas todas as observações que não se situavam no interior de um intervalo de confiança de 90%. Este método permitiu não só obter a média dos desvios entre os dois sistemas de coordenadas, mas também o seu desvio padrão. A mesma metodologia foi aplicada aos pontos fotogramétricos, mas neste caso, o conjunto de pontos utilizado foi mais reduzido, uma vez que apenas puderam ser utilizados os pontos que se encontravam representados na carta, tais como cruzamentos e moinhos. Novamente, foram, também, obtidos o valor médio e o desvio padrão das diferenças verificadas entre a carta e os pontos catalogados, depois de as observações terem sido sujeitas a um teste estatístico com nível de confiança de 90%. Os “parâmetros de transformação” entre coordenadas dos PFs e dos VGs foram obtidos, para cada data, através da adição dos valores médios das diferenças entre os PFs documentados e a carta e das diferenças entre a carta e os VGs documentados. Tendo em conta os desvios padrão de cada conjunto de diferenças, foi realizada a propagação destas incertezas a fim de determinar o desvio padrão destes “parâmetros”. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Parâmetros de transformação entre sistemas de coordenadas dos pontos fotogramétricos e dos vértices geodésicos, para várias datas e respectivas incertezas.

Data dos PFs	Parâmetros (m)		Desvio Padrão (m)	
	Diferenças em X	Diferenças em Y	Diferenças em X	Diferenças em Y
1942	-4,34	-4,70	13,26	30,14
1944	-14,58	-21,12	15,48	9,83
1952	21,82	59,77	46,10	67,49
1957	14,74	9,23	18,86	13,09
1960	7,06	-6,84	17,25	11,64
1966	-5,79	2,43	38,56	10,96

Através da análise da tabela, verifica-se que, para quase todas as datas, a incerteza dos parâmetros é superior a estes, logo não se pode concluir que tenha havido de facto alguma alteração significativa entre as coordenadas. Dado que os desvios padrão são muito elevados, pode-se concluir que os parâmetros encontrados não são muito fiáveis e se estes fossem aplicados às coordenadas dos PFs das diferentes datas, provavelmente, estariam a introduzir

erros. Quanto à coordenada Y referente ao ano 1944, esta é a única que apresenta um valor médio das diferenças maior que o desvio padrão, indicando que houve, realmente, uma alteração dos sistemas de coordenadas. No entanto, no caderno de PFs referente a 1944 foram encontradas várias informações sobre a fraca qualidade dos pontos registados. É possível que alguns dos pontos de coordenadas erradas não tenham sido assinalados no caderno e, conseqüentemente, tenham sido utilizados para efectuar esta análise e tenham contribuído com erros que não foram detectados.

5.4. Triangulação Aérea

Segundo Redweik (2007), a aerotriangulação é o conjunto de algoritmos matemáticos e estatísticos que, através da geometria da fotografia e das coordenadas terreno de um pequeno conjunto de PFs, possibilitam a determinação de coordenadas terreno de todos os pontos de apoio encontrados durante a triangulação automática e as orientações espaciais das fotografias ou dos modelos de um bloco.

O método de aerotriangulação mais utilizado actualmente é a aerotriangulação em bloco por feixes perspectivos. Esta técnica recorre às equações de colinearidade, as quais traduzem o facto de o ponto-objecto, o ponto-imagem correspondente e o centro de projecção da fotografia estarem situados sobre a mesma recta. As equações de colinearidade referentes tanto aos pontos homólogos como aos pontos fotogramétricos são resolvidas simultaneamente através de um ajustamento pelo método dos mínimos quadrados [Wolf, 1974]. A aerotriangulação em bloco por feixes perspectivos apresenta grandes vantagens face a outras técnicas. Uma vez que não é exigida a criação de modelos estereoscópicos, em teoria devia ser possível atingir uma melhor precisão das coordenadas objecto finais. No entanto, este objectivo só é conseguido se forem estimados durante a triangulação os valores das correcções a diversos erros sistemáticos presentes nas fotografias: parâmetros adicionais. Entre estes parâmetros, podem estar também incluídas correcções aos parâmetros de orientação interna. Através dos últimos parâmetros referidos, os denominados parâmetros de auto-calibração, é possível obter valores para as distorções das lentes utilizadas [Redweik, 2005]. Esta possibilidade é de grande importância para o presente trabalho, uma vez que não existe certificado de calibração da câmara que permita aceder a esta informação.

5.4.1. Aquisição dos Dados de Entrada para a Triangulação Aérea

Antes de realizar uma triangulação aérea, são vários os passos que têm de ser efectuados para reunir todos os dados indispensáveis à realização desta. Uma vez que a triangulação em bloco por feixes perspectivos com parâmetros adicionais e auto-calibração é realizada através de um ajustamento pelo método dos mínimos quadrados e as equações de colinearidade não são lineares, estas têm de ser linearizadas e para resolver o sistema de equações são necessárias aproximações iniciais para todas as incógnitas. Por esta razão, um dos passos necessários antes de começar a recuperação geométrica das imagens foi a aquisição de aproximações iniciais aos parâmetros de orientação externa de todas as fotografias.

Os parâmetros de orientação externa são 6 e definem a posição espacial e a orientação das fotografias no momento de exposição. Estes consistem nas três coordenadas do centro de projecção da fotografia num sistema de coordenadas terreno e em três ângulos. Existe mais do que um sistema de ângulos que pode ser utilizado, mas o mais frequente e fácil de trabalhar, matematicamente, é o sistema *omega-fi-kapa*. Este sistema considera três ângulos, os quais permitem relacionar os eixos do sistema de coordenadas foto (tridimensional e com origem no centro de projecção da fotografia) com os eixos do sistema de coordenadas terreno. O ângulo *omega* mede a rotação em torno do eixo dos *xx* do sistema de coordenadas terreno. O ângulo *fi* é o responsável pela rotação do eixo dos *yy* e o *kapa* pela do eixo dos *zz*. As três rotações em conjunto permitem alinhar os eixos do sistema de coordenadas foto com os do sistema de coordenadas terreno [Wolf, 1974].

Um dos aspectos mais importantes quando se faz a ligação de uma cobertura fotográfica ao terreno é a escolha do sistema de coordenadas. Na realidade, são utilizados dois sistemas de coordenadas: um planimétrico e outro altimétrico. É de vital importância que todos os dados introduzidos sejam referentes ao mesmo sistema de coordenadas. O sistema escolhido para os dados da planimetria foi o Hayford-Gauss *Datum* Lisboa Militares, uma vez que os pontos fotogramétricos utilizados encontravam-se neste sistema. Este é também o sistema de coordenadas utilizado nas folhas antigas da carta 1:25000, a partir das quais foram adquiridas as coordenadas planimétricas dos centros de projecção. Quanto à altimetria, foi utilizado o *Datum* Altimétrico Nacional, o qual tem como referência o marégrafo de Cascais, pelas mesmas razões que levaram à selecção do *datum* planimétrico.

A aquisição das coordenadas dos centros de projecção de todas as imagens foi um processo demorado, principalmente, devido ao elevado número de fotografias. Todas as folhas da carta 1:25000 foram georreferenciadas em ArcGIS[®], com erros médios quadrados não superiores a 2,5 m. As fotografias foram, então, comparadas com as respectivas folhas (de acordo com o enquadramento existente no IGeoE), e, para cada uma destas, foi localizado o seu centro sobre a folha e foram registadas as suas coordenadas planimétricas e altimétricas. As coordenadas planimétricas foram observadas directamente no ArcGIS[®] e puderam ser introduzidas directamente no ISAT[®]. Esta localização não foi muito precisa, uma vez que alguns centros de projecção encontravam-se localizados em água (Figura 5.26) e outros em zonas onde na folha apenas estavam representadas curvas de nível.

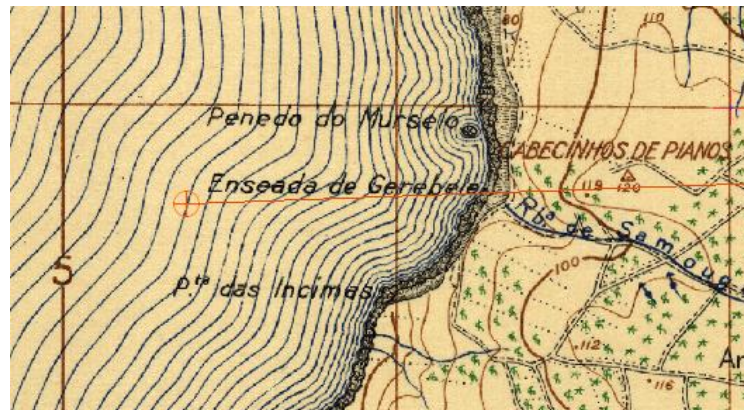


Figura 5.26 – Centro de fotografia localizado sobre água.

A coordenada altimétrica foi obtida através da observação das curvas de nível presentes na vizinhança do ponto. A interpolação realizada para obter estes valores foi feita de forma muito aproximada, até porque não era necessário realizar esta tarefa com uma precisão muito elevada, uma vez que o objectivo era apenas a obtenção de aproximações iniciais que, posteriormente, seriam corrigidas durante a triangulação. Foi realizada uma média aritmética de todas estas observações, a fim de obter um valor para a cota média do terreno, o qual também é um dos dados de entrada para a triangulação. Para adquirir a altitude de voo aproximada para cada fotografia, uma vez que a cota do terreno já era conhecida, faltava determinar a altura de voo sobre o solo. Estes valores podem ser calculados a partir da escala do voo, uma vez que, por definição, correspondem ao produto entre a constante da câmara e o módulo da escala da fotografia. Como já foi dito, estes valores são apenas aproximações iniciais, não sendo necessário muito rigor na sua determinação. Desta forma, foi determinada

a escala média das fotografias para cada uma das 13 fiadas consideradas e, conseqüentemente, foi obtida uma altura média sobre o solo para cada fiada. A cada um destes 13 valores foi adicionada a cota média do terreno de cada fiada (obtidas através da média aritmética das cotas observadas para cada centro de fotografia), obtendo-se assim a altitude média por fiada, a qual foi introduzida no ISAT[®]. A determinação da escala média de cada fiada foi feita através da média aritmética das escalas determinadas para três imagens: uma no início, outra no meio e outra no fim das fiadas. Para evitar a aceleração do processo de degradação dos negativos originais do voo, e tendo em conta o facto de apenas se pretenderem valores aproximados, a determinação da escala das fotografias foi feita através de um método expedito. Como já foi explicado no capítulo dedicado à orientação interna, houve necessidade de utilizar valores aproximados das coordenadas foto das marcas fiduciais, tendo sido medida a distância entre os ângulos rectos formados por marcas opostas sobre um negativo original. A partir dos valores registados, foram determinadas as coordenadas aproximadas das marcas relativamente ao centro da imagem. As fotografias seleccionadas para obter os valores da escala média foram “referenciadas” no ArcGIS[®] atribuindo aos ângulos rectos das marcas os valores das coordenadas referidos. Desta forma, as imagens ficaram associadas a um sistema métrico, tendo sido utilizadas as ferramentas do ArcGIS[®] para medir a distância entre dois pontos o mais afastados possível. Devido a questões de conservação do património antigo, nem todas as folhas antigas foram disponibilizadas em papel. Por esta razão, as medições das distâncias na carta correspondentes às medidas sobre as fotografias também foram feitas no ArcGIS[®]. Como as folhas estavam georreferenciadas, as distâncias observadas já eram referentes ao terreno. Foi calculado o quociente entre as distâncias medidas na fotografia e as medidas na carta e realizou-se a média aritmética dos três valores obtidos para cada fiada.

A aquisição dos valores iniciais para os parâmetros angulares da orientação externa foi mais simples que a dos parâmetros posicionais. Os ângulos *omega* e *fi* são, normalmente, valores muito baixos e próximos de 0°. Desta forma, foi atribuído o valor de 0° a ambos os ângulos, para todas as imagens. Quanto ao ângulo *kapa*, este está directamente relacionado com o rumo do voo, sendo, portanto, dependente do sentido da fiada [Redweik, 2005]. Como valores iniciais, foi atribuído o valor de 0° às fotografias pertencentes a fiadas voadas de Oeste para Este e 180° às pertencentes a fiadas voadas no sentido oposto. Estes valores foram importados directamente para o ISAT[®], sem necessitarem de nenhuma outra operação.

Os valores das aproximações iniciais foram utilizados para elaborar um enquadramento das fotos na área de trabalho, pelo seu centro. Este enquadramento (Figura 5.27), para além da posição das fotografias, contém, ainda, a sua identificação

(circunferências laranja), a localização dos PFs considerados na primeira fase do trabalho (triângulos azuis) e mostra a forma como estas estão organizadas em fiadas.

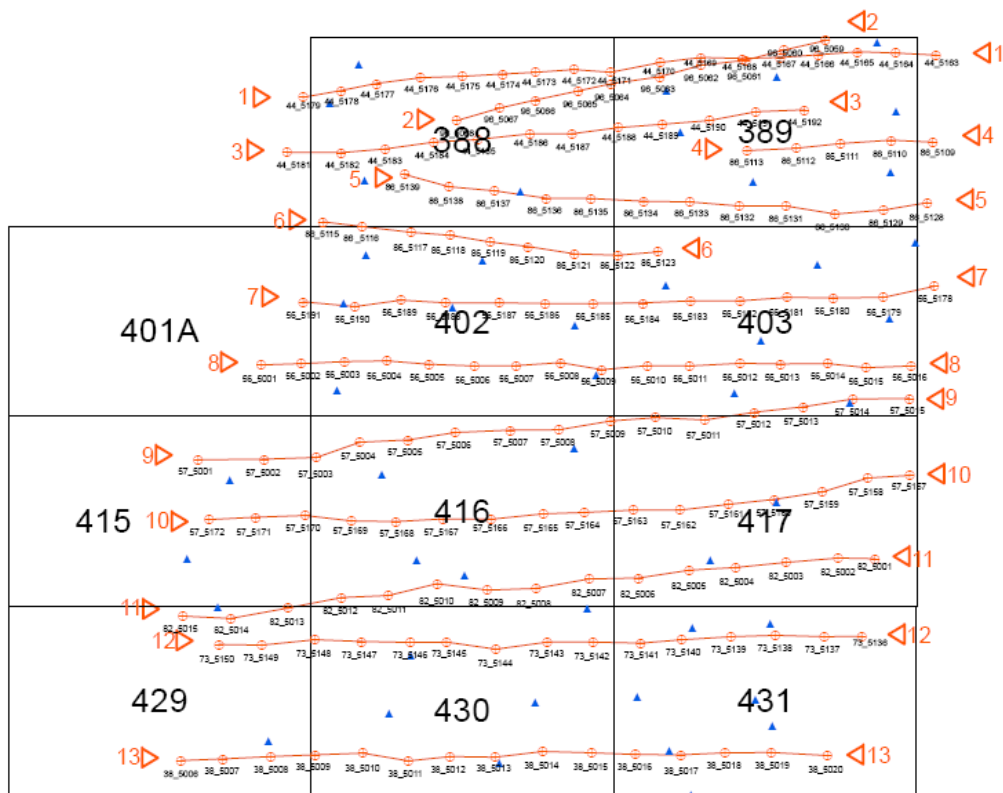


Figura 5.27 – Enquadramento de apoio à aerotriangulação, elaborado a partir das aproximações iniciais aos parâmetros de orientação externa.

As aproximações iniciais dos parâmetros de orientação externa começam por ser utilizadas como dados iniciais para a triangulação automática. Durante este processo, os pontos homólogos encontrados são utilizados para determinar correcções aos parâmetros introduzidos inicialmente, sendo adquiridos novos parâmetros. A análise destes valores, durante esta fase do trabalho é de extrema importância. Apesar de não existirem dados para verificar se os parâmetros posicionais ou os ângulos *omega* e *fi* se encontram correctos, o valor do ângulo *kapa* é um bom indicador para avaliar se foram cometidos erros nas tarefas anteriores, nomeadamente, na orientação interna. Numa primeira tentativa de realização da triangulação aérea, estes valores não foram verificados. O facto de, como já foi mencionado, a orientação interna ter sido mal realizada numa fase inicial do trabalho, levou à determinação de correcções incorrectas às aproximações iniciais durante a triangulação automática. Mesmo

após a medição dos pontos fotogramétricos e da realização da triangulação por feixes perspectivos, estes valores dos parâmetros angulares não foram corrigidos. A consequência deste erro foi a aquisição de parâmetros de orientação externa errados, cujo efeito pôde ser observado quando os modelos estereoscópicos foram observados no ISSD[®], onde foi possível verificar que todos os pontos fotogramétricos se encontravam projectados em localizações bastante distantes daquelas onde haviam sido medidos. As distâncias observadas, na maioria dos casos, apresentavam valores próximos dos 10 m. A fonte deste erro só foi detectada, quando os valores do ângulo *kapa* determinados na triangulação automática foram confrontados com os valores esperados e foi verificado que estes estavam distanciados de 180°. Constatou-se que a causa desta discrepância fora a orientação interna executada erradamente, e que para além do ângulo *kapa*, também os ângulos *omega* e *fi* deveriam estar errados, sendo pequenos erros nos seus valores suficientes para causar os problemas observados no ISSD[®]. Depois de a orientação interna ter sido corrigida, os valores obtidos na orientação externa passaram a apresentar valores mais correctos. Os valores corrigidos destes parâmetros, que saíram da triangulação automática, foram os valores de entrada para a realização da triangulação por feixes perspectivos.

5.4.2. Realização da Triangulação Aérea

5.4.2.1. Triangulação Aérea por Feixes Perspectivos

Depois de reunidos todos os dados de entrada, de ter sido recuperada a orientação interna de todas as fotografias, adquiridas as coordenadas foto dos pontos homólogos e dos pontos fotogramétricos, assim como as coordenadas terreno destes últimos, ficaram reunidas quase todas as condições necessárias à realização da triangulação aérea em bloco por feixes perspectivos com parâmetros adicionais e auto-calibração. Uma triangulação aérea não tem apenas em conta o modelo matemático que relaciona as várias variáveis envolvidas no processo. Esta técnica considera, também, o modelo estatístico. Desta forma, antes de iniciar a triangulação, é necessário definir qual a precisão *a priori* das coordenadas foto, assim como a precisão das coordenadas terreno dos pontos fotogramétricos. Para a precisão das coordenadas foto foi utilizado o valor de 100 μm . O valor escolhido inicialmente foi o correspondente ao tamanho do pixel: 21 μm ; no entanto, no decorrer da execução de várias tentativas de triangulação, os resultados obtidos para precisão das coordenadas foto *a posteriori* situavam-

-se próximos dos 100 μm e, por essa razão, este valor passou a ser utilizado como referência. Para a precisão das coordenadas terreno dos pontos fotogramétricos, como estes valores são desconhecidos, foram utilizados os valores indicados por defeito pelo ISAT[®]: 0,10 m para cada coordenada.

Para cada um dos pontos homólogos e dos pontos fotogramétricos, podem ser escritas duas equações de colinearidade, por cada fotografia em que estes pontos são visíveis. Estas traduzem o facto do ponto-objecto, o ponto-imagem e o centro de projecção se encontrarem sobre a mesma recta. As equações de colinearidade em ordem às coordenadas foto podem ser escritas da seguinte forma:

$$x = x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y = y_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

onde x e y são as coordenadas foto de um ponto homólogo ou de um ponto fotogramétrico; x_0 e y_0 são as coordenadas foto calibradas do ponto principal; c é a constante da câmara; r_{11} , r_{12} , r_{13} , r_{21} , r_{22} , r_{23} , r_{31} , r_{32} e r_{33} são os elementos de uma matriz de rotação que depende dos ângulos ω , ϕ e κ ; X , Y e Z são as coordenadas terreno do ponto homólogo ou fotogramétrico e X_0 , Y_0 e Z_0 são as coordenadas terreno do centro de projecção.

Como estas equações relacionam várias variáveis cujos valores não são conhecidos, como os parâmetros de orientação externa das fotografias (X_0 , Y_0 , Z_0 , ω , ϕ e κ) e as coordenadas terreno dos pontos homólogos, as equações têm de ser linearizadas para que seja possível estimar os seus valores pelo método dos mínimos quadrados. A necessidade de linearizar as expressões implica que sejam fornecidas ao programa as já mencionadas aproximações iniciais de todas as incógnitas, a fim de obter correcções para estes valores [Redweik, 2005]. Estas correcções são obtidas depois de várias iterações, em que cada conjunto de correcções é adicionado aos valores iniciais, para determinar novas aproximações para a iteração seguinte. Este processo é repetido até as correcções serem insignificantes ou ser ultrapassado o número máximo de iterações definido pelo operador. Para os parâmetros de orientação externa posicionais o valor definido como “baliza” para as correcções foi de 1 m e para os parâmetros angulares foi de 0,01°. O número máximo de iterações foi 10.

5.4.2.2. Auto-Calibração

O ISAT[®] fornece a possibilidade de determinar correcções aos parâmetros de orientação interna. Este processo denomina-se por auto-calibração. Apesar de o número de incógnitas aumentar quando estas correcções são calculadas, é possível obter resultados mais satisfatórios nesta situação [Redweik, 2005]. Como a literatura contemporânea das fotografias indica, as lentes utilizadas na obtenção destas não eram as mais apropriadas para a aquisição de fotografias destinadas à produção cartográfica [American Society of Photogrammetry, 1952; American Society of Photogrammetry, 1980], portanto, no decorrer da realização da aerotriangulação executada neste trabalho, foi realizada a auto-calibração da câmara. Este processo foi efectuado através da determinação dos parâmetros de Ebner. Os parâmetros de Ebner são 12 no total (b_1, \dots, b_{12}) e cada um deles corresponde a um tipo de distorção da imagem. Estas distorções são identificadas através dos pontos fotogramétricos e dos pontos de ligação, os quais são utilizados para formular equações de observação, que entram no processo de ajustamento pelo método dos mínimos quadrados juntamente com as equações colineares linearizadas. Os parâmetros de Ebner que são procurados, são aproximadamente perpendiculares entre si, ou seja, se um dos parâmetros descreve um tipo de distorção ao longo do eixo dos xx , outro descreve o mesmo tipo de deformação, mas ao longo do eixo dos yy . O objectivo é obter parâmetros que estejam o mínimo possível correlacionados entre eles, pois se forem utilizados parâmetros com elevada correlação ou com valores insignificantes, a estabilidade do bloco é prejudicada [Ebner, 1976; Intergraph Corporation, 2008]. Por esta razão, na realização do presente trabalho, foram estimados os 12 parâmetros de Ebner, mas apenas 6 destes foram considerados significativos ($b_1, b_2, b_7, b_8, b_{10}$ e b_{11}), e, portanto, apenas estes foram considerados na solução final (Figura 5.28).

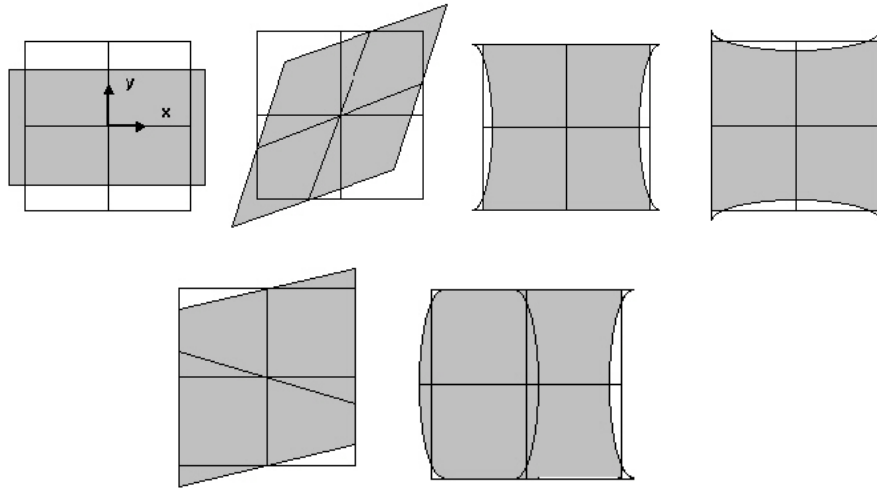


Figura 5.28 – Distorções detectadas nas fotografias do RAF47 durante a auto-calibração, adaptada de Intergraph Corporation (2008).

Foi realizada uma primeira triangulação aérea por feixes perspectivas para determinar quais os parâmetros significativos presentes nas imagens e quais os seus valores e desvios padrão. Contudo, foi necessário realizar uma segunda triangulação aérea para incluir estes parâmetros na solução. Durante todo este processo, foi obtido um modelo para as distorções das lentes (Figura 5.29) utilizadas na aquisição das fotografias estudadas.

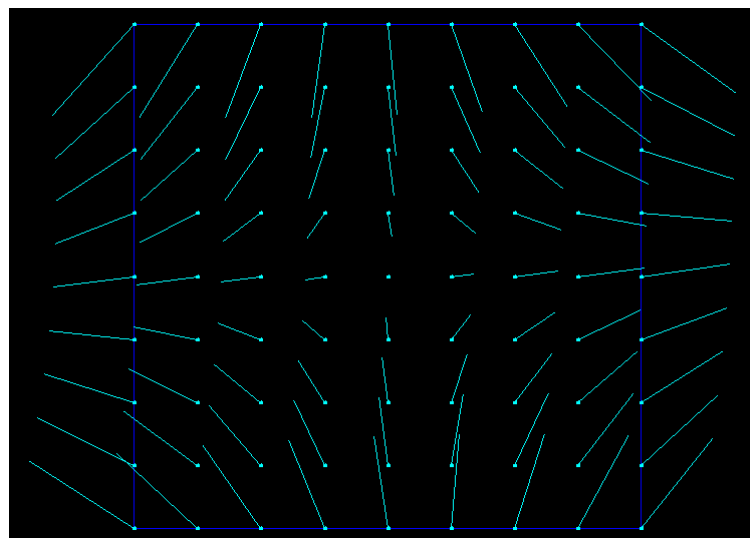


Figura 5.29 – Modelo das distorções das lentes utilizadas na aquisição das fotografias, adquirido com o ISAT[®].

5.4.3. Análise dos Resultados

A realização da triangulação aérea foi uma das fases mais complexas do trabalho efectuado. Ao longo de três meses foram realizadas 32 tentativas de triangulação, nas quais foram testados diversos factores que influenciam este método de recuperação da informação geométrica de imagens. Para além das diferentes tentativas de orientação interna, foram testados diferentes valores de precisão de coordenadas foto *a priori* e de coordenadas terreno dos pontos fotogramétricos (para alterar o sistema de pesos do ajustamento), diferentes configurações geométricas dos pontos fotogramétricos e, ainda, foi feita a divisão do bloco estudado em 4 blocos de dimensões inferiores, a fim de tentar obter melhores resultados na triangulação automática (o que não se verificou).

Na melhor solução encontrada, verificou-se que a fiada localizada mais a Sul (fiada 13) foi rejeitada, não tendo sido determinados os seus parâmetros de orientação externa. Uma vez que foram encontrados muito poucos pontos de ligação entre esta fiada e a fiada adjacente, talvez devido ao facto de a zona de sobreposição lateral entre estas ser muito menor que as das fiadas restantes, foram medidos manualmente 42 pontos distribuídos uniformemente ao longo da zona comum às duas fiadas. No entanto, mesmo após esta tarefa, as imagens continuaram a ser rejeitadas. Contudo, esta rejeição não foi totalmente inesperada. Estas imagens representam toda a costa Sul da península de Lisboa e grande parte da sua superfície está coberta por água, o que resulta numa distribuição dos pontos homólogos desequilibrada. Aliado a este facto, verificou-se, ainda, que estas são as imagens com pior qualidade radiométrica, o que se traduziu em leituras mais problemáticas das coordenadas foto dos pontos fotogramétricos. Desta forma, das 169 imagens iniciais, apenas 154 foram orientadas.

O valor da precisão das coordenadas foto *a posteriori* (*sigma naught*) foi de 241,9 μm , o qual é muito superior ao valor de 100 μm considerado para precisão das coordenadas foto *a priori*. No entanto, a cobertura fotográfica ficou bem ajustada aos pontos fotogramétricos, tal como mostram os erros médios quadráticos presentes na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Erros Médios Quadráticos dos pontos fotogramétricos e de verificação e resíduos dos pontos fotogramétricos, com auto-calibração.

	X (m)	Y (m)	Z (m)
E.M.Q. Pontos Fotogramétricos	0,614	0,698	1,051
E.M.Q. Pontos de Verificação	5,832	4,641	11,402
Resíduos Pontos Fotogramétricos	1,573	1,829	2,427

Como tolerâncias para os erros dos pontos observados, foram definidos, tendo em conta a qualidade das imagens e a, praticamente, inexistente informação sobre a câmara, os valores de 1 m para os erros médios quadráticos para as duas coordenadas planimétricas e 1,5 m para a coordenada altimétrica. Quanto aos resíduos, os valores usados foram 2 m para a planimetria e 3 m para a altimetria. Verificou-se, desta forma, que tanto os erros médios quadráticos dos PFs como os seus resíduos se encontravam dentro das tolerâncias pré-definidas. Porém, os pontos de verificação não obedeciam a esta condição. Esta discrepância pode ser justificada pela instabilidade geométrica do bloco devido à fraca qualidade dos pontos homólogos. Esta razão justifica, também, o elevado valor do parâmetro *sigma naught*. Para que a cobertura ficasse devidamente ajustada aos PFs, a confiança dada aos pontos homólogos teve de ser diminuída, resultando numa elevada incerteza das coordenadas foto.

Uma vez que a qualidade dos pontos fotogramétricos e dos pontos homólogos não é a desejada, foi colocada a hipótese de os parâmetros de auto-calibração estarem a piorar a solução. Foi, então, realizada uma outra triangulação aérea, sem considerar o cálculo destes valores. A precisão das coordenadas foto *a posteriori* passou a ser 152,6 μm . Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Erros Médios Quadráticos dos pontos fotogramétricos e de verificação e resíduos dos pontos fotogramétricos, sem auto-calibração.

	X (m)	Y (m)	Z (m)
E.M.Q. Pontos Fotogramétricos	0,275	0,316	0,1
E.M.Q. Pontos de Verificação	12,015	15,021	23,618
Resíduos Pontos Fotogramétricos	0,906	0,866	0,336

Apesar dos valores do *sigma naught*, dos erros médios quadráticos e dos resíduos dos PFs terem melhorado significativamente nesta segunda solução, verificou-se um elevado aumento nos valores dos erros médios quadráticos dos pontos de verificação. Isto significa

que a cobertura está ainda mais desajustada da realidade do que na primeira solução, ou seja, que a geometria do bloco está ainda mais instável. Uma vez que os erros médios quadráticos e os resíduos dos PFs ficam abaixo das tolerâncias em ambas as soluções, foi escolhida a primeira solução, pois é a que apresenta melhores resultados nos pontos que não foram incluídos no ajustamento e, por isso, é aquela que oferece um resultado globalmente mais correcto.

5.5. Controlo de Qualidade da Aerotriangulação

Para efectuar um controlo de qualidade adequado para uma triangulação aérea, é necessário realizar observações de pontos que não foram incluídos no ajustamento. Devido à dificuldade em registar correctamente as coordenadas foto dos PFs e à impossibilidade de observar muitos dos objectos catalogados (como, por exemplo, bolembreanas), o número de pontos observados para efectuar o controlo de qualidade foi bastante reduzido. Contudo, foi seleccionado um conjunto de 14 pontos, bem distribuídos no bloco (Figura 5.30), cuja localização foi possível identificar sem ambiguidades e foi possível observar as suas coordenadas foto com uma precisão aceitável tendo em conta a qualidade das fotografias.

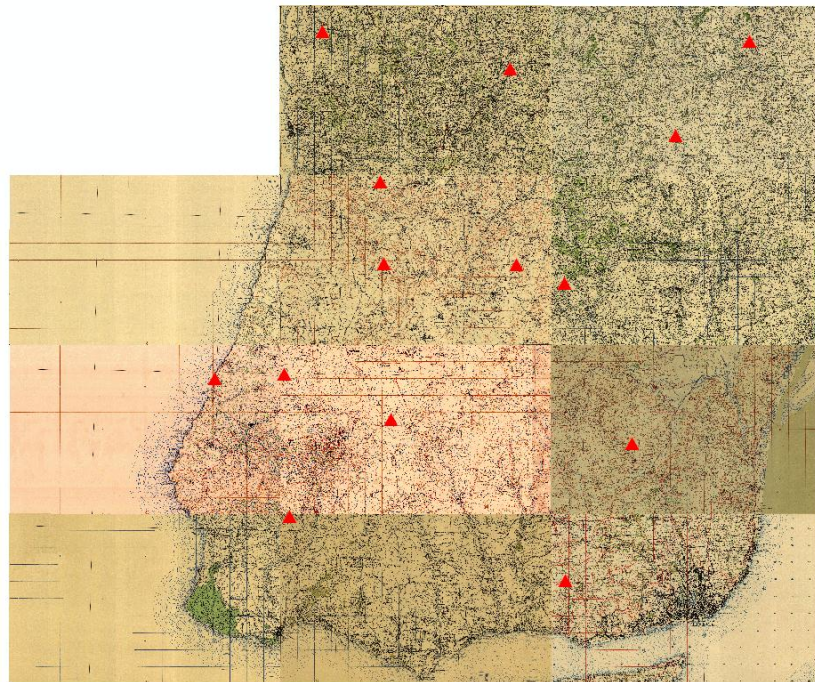


Figura 5.30 – Distribuição dos pontos de verificação no bloco (triângulos vermelhos).

Os resultados obtidos durante a triangulação aérea tornaram inútil a realização de um controlo de qualidade como o que normalmente se faz nas triangulações com dados actuais. Estes estudos consistem na observação dos vértices geodésicos representados nas imagens orientadas e no cálculo das percentagens de pontos que apresentam resíduos inferiores a 0,80 m; entre 0,80 m e 1,20 m e superiores a 1,20 m. Este tipo de controlo não pôde ser feito porque todos os pontos de verificação apresentavam resíduos superiores a 1,20 m.

Face aos resultados obtidos, foi elaborada uma outra estratégia para efectuar o controlo de qualidade. Foram realizadas observações das coordenadas terreno dos pontos de verificação em todos os modelos estereoscópicos em que estes se encontravam representados. Estas observações foram feitas no ISSD[®]. Para cada ponto de verificação, foram calculados o valor médio e o desvio padrão para cada coordenada.



Figura 5.31 – Elipses de erro absolutas dos pontos de verificação.

Na figura apresentada em cima, os segmentos de recta representados a azul-escuro correspondem às diferenças entre as coordenadas documentadas dos pontos de verificação e o valor médio das coordenadas observadas. Através da figura, é possível concluir que não existem erros sistemáticos na triangulação realizada, uma vez que estes vectores, para além de

variarem em magnitude, também divergem em direcção e em sentido. As elipses representadas são elipses de erro absolutas, ou seja, representam a incerteza de cada ponto relativamente à origem do sistema de coordenadas utilizado. Estas elipses foram construídas tendo em conta os valores dos desvios padrão das observações para as coordenadas planimétricas. As duas coordenadas foram consideradas como sendo independentes entre elas, ou seja, a co-variância entre elas foi considerada igual a 0. Apesar de a incerteza média na área estudada ser de 6 m, esta apresenta algumas variações. Existem zonas onde a incerteza é maior na direcção horizontal do que na vertical e outras onde se verifica o contrário. Também as dimensões das elipses são variáveis. Ao enquadrar as elipses sobre o esquema da distribuição dos pontos fotogramétricos sobre o bloco, verificou-se que os pontos de verificação que apresentavam elipses menores (como o vértice geodésico Terras) estavam mais próximos de pontos que foram utilizados como pontos fotogramétricos do que os restantes. Esta análise confirma a suspeita de que as fotografias estão bem ajustadas aos pontos fotogramétricos, mas divergem quando se afastam destes, tal como já havia sido indicado pelos valores dos erros médios quadráticos dos pontos de verificação obtidos no ISAT®.

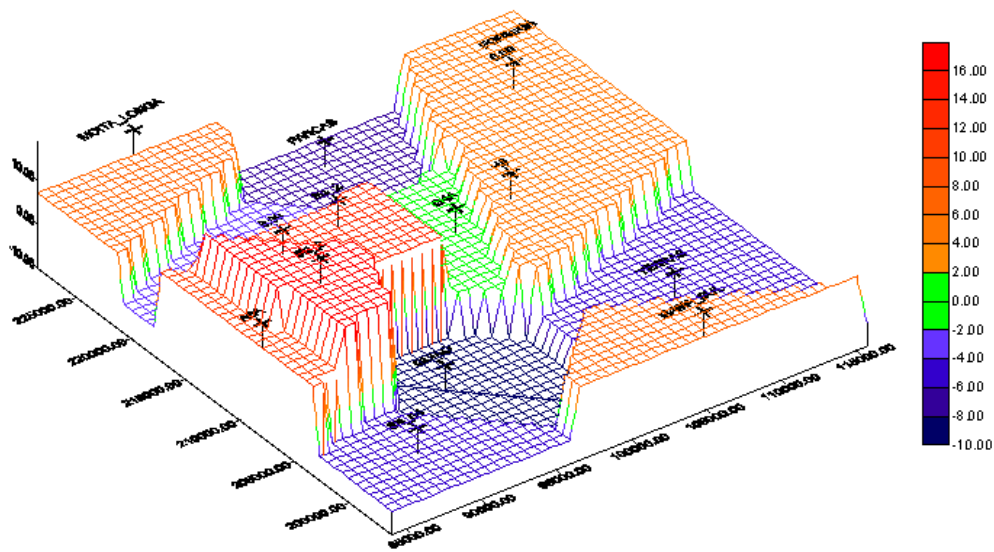


Figura 5.32 – Superfície com as diferenças verificadas em altimetria, em metros, obtida com o Surfer®.

Quanto à altimetria, a figura 5.32 contém uma superfície onde se encontram representados os valores das diferenças entre as altitudes documentadas dos pontos e os valores médios das altitudes observadas no ISSD®. O aspecto “descontínuo” da superfície é

devido ao baixo número de pontos de verificação. Através da análise da figura, verifica-se que a altimetria diverge bastante ao longo da área de estudo, havendo regiões onde os pontos observados para verificação encontram-se acima do esperado e outras onde estes se encontram abaixo. Os pontos onde os valores de diferença altimétrica se encontram abaixo da tolerância definida são muito poucos e observa-se a existência de uma grande amplitude de valores para as diferenças.

Foi também efectuado um teste de controlo de qualidade às técnicas de processamento de imagem. Independentemente do aspecto das fotografias depois de processadas, o sucesso dos algoritmos construídos tem de ser verificado através dos resultados obtidos nas triangulações automáticas efectuadas com as imagens tratadas. O teste realizado consistiu na comparação dos resultados da triangulação automática obtidos com cada tipo de processamento. Foi utilizado um bloco de 16 imagens, formado por 4 fiadas horizontais, com sentidos diferentes. Foram realizadas três triangulações automáticas: uma com as imagens originais, outra com as imagens tratadas com a opção “Luminosidade Variável” e outra com a opção “Grandes Descontinuidades”. As três triangulações foram completamente executadas (não ocorreu nenhum erro durante o processo). Os valores da precisão das coordenadas foto e o número de pontos homólogos encontrados estão na tabela situada em baixo.

Tabela 5.6 – Precisão das coordenadas foto e número de pontos encontrado durante a triangulação automática para cada tipo de tratamento de imagens.

	Opções de Tratamento das Imagens		
	Originais	Luminosidade Variável	Grandes Descontinuidades
Sigma (μm)	358,2	356,5	364,4
N.º Pontos Homólogos	1360	1361	1407

Pela tabela exposta, verifica-se que os valores da precisão das coordenadas foto (*sigma*) obtidos na triangulação automática são bastante semelhantes para os três tipos de imagens. Também a partir do número de pontos homólogos encontrados não é possível inferir se um dos três tipos de imagens é mais adequado para a utilização em triangulações automáticas. Apesar de nas imagens tratadas com a opção “Grandes Descontinuidades” ter sido detectado um maior número de pontos, este aumento não é muito elevado e as coordenadas foto têm uma precisão menor. As elevadas semelhanças entre os resultados obtidos com os três tipos de imagens podem ser explicadas pelo facto de o ISAT[®], durante a triangulação automática, calcular, para cada par de imagens, dois parâmetros de

transformação, que quando aplicados à imagem da direita, tornam-na radiometricamente semelhante à da esquerda. Desta forma, parece ser indiferente realizar a triangulação automática com as imagens originais ou com as imagens processadas. No entanto, este teste foi realizado com um número de fotografias reduzido e não existem indícios de que este comportamento se verifique na totalidade da cobertura fotográfica.

5.6. Base de Dados Foto-geográfica com os Resultados da Aerotriangulação

Para organizar a informação adquirida pelos processos descritos anteriormente, foi construída uma base de dados foto-geográfica, em ArcGIS[®]. O principal objectivo desta é o armazenamento de toda a informação recolhida, para que seja possível, a qualquer utilizador, encontrar facilmente os dados que necessita consultar.

A base de dados foto-geográfica foi construída sobre um “mosaico” constituído pelas primeiras edições das folhas da carta 1:25000 correspondentes à área de estudo. Estas folhas foram georreferenciadas, de forma a não apresentarem descontinuidades entre elas. Através das coordenadas planimétricas dos centros de projecção, as 169 fotografias consideradas no início do projecto, foram implantadas na carta, nas localizações correspondentes.

Foi construída uma tabela de atributos que a cada fotografia fez corresponder informação sobre esta. Os primeiros campos da tabela são referentes à identificação da imagem: o número, a fiada, o rolo onde se encontra registada e o nome com que está guardada no arquivo do IGeoE. Foram incluídos na tabela vários dados calculados ao longo da realização deste trabalho, tais como os seis parâmetros de orientação externa, os seis parâmetros de transformação afim e os 12 parâmetros de Ebner. Para além disso, foram, também, incluídos dados referentes à câmara, tal como o nome, tipo de objectiva e a constante da câmara, para que estas informações não se percam e possam ser utilizadas em trabalhos futuros que envolvam estas imagens. Para cada uma das fotografias, foi ainda incluída uma miniatura desta (Figura 5.33).

Todos os valores numéricos registados na tabela de atributos encontram-se nas unidades do Sistema Internacional de Unidades. Em algumas situações, esta escolha pode parecer desadequada, como no caso da constante da câmara que, normalmente, é apresentada em milímetros e na base de dados encontra-se em metros. No entanto, esta base de dados destina-se a ser consultada por utilizadores de diversas áreas, os quais podem não estar muito

familiarizados com as unidades habitualmente utilizadas. Portanto, foi adoptada esta solução numa tentativa de uniformização.

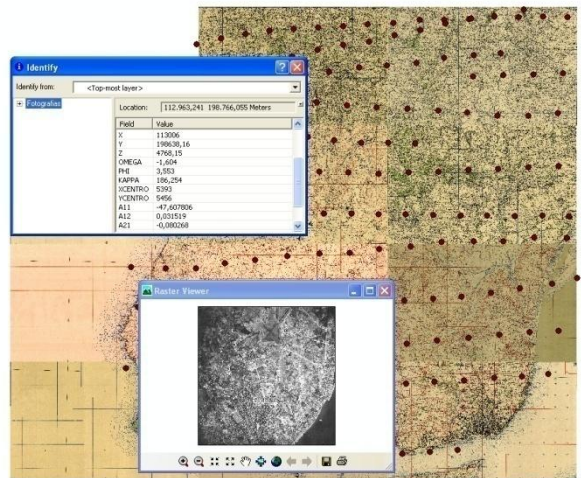


Figura 5.33 – Exemplo de informação que pode ser consultada na base de dados foto-geográfica.

As funcionalidades do ArcGIS[®] permitem a realização de diversas pesquisas aos dados registados, possibilitando aos utilizadores da base de dados foto-geográfica construída, encontrar de forma fácil e rápida a informação desejada. Na Figura 5.34, encontra-se assinalado o resultado de uma pesquisa realizada sobre a base de dados (círculos azuis), a qual incidiu sobre as fotografias que foram registadas num mesmo rolo. Qualquer um dos campos da tabela de atributos pode ser alvo da execução de pesquisas, sendo possível combinar vários atributos numa única “pergunta”.

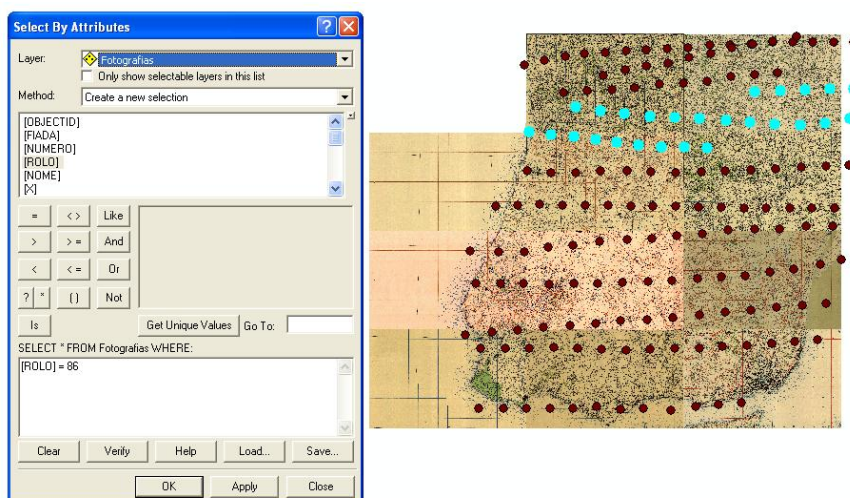


Figura 5.34 – Exemplo de pesquisa realizada sobre a base de dados geográfica, no ArcGIS[®].

6. Capítulo VI – Conclusões

A realização de diversos trabalhos de natureza científica, que envolvem o estudo do comportamento de certos fenómenos com o passar do tempo, chamou a atenção para a importância das fotografias aéreas antigas e para os problemas relacionados com estas, como, por exemplo, a conservação das imagens originais. Esta questão é extremamente importante, para assegurar que as gerações futuras terão acesso a este património de importância inquestionável. É de louvar a atitude do Instituto Geográfico do Exército, que tão grandes esforços tem realizado para garantir a sobrevivência do voo RAF47 ao longo dos 61 anos em que estas fotografias têm estado à sua guarda.

A necessidade de trabalhar com estas imagens obrigou a que fosse efectuada alguma pesquisa histórica sobre a forma como estas foram adquiridas. Apesar da informação sobre o avião ser pouco mais do que uma curiosidade, a informação relativa à câmara e às lentes, nomeadamente, o valor da constante da câmara, foram fundamentais para a realização do trabalho e, sem estes, não teria sido possível realizar a recuperação geométrica das imagens.

As imagens do RAF47, antes de começarem a ser trabalhadas, apresentavam vários problemas radiométricos, os quais se pensava que tornariam impraticável a realização de uma triangulação automática. Porém, os dois tipos de processamento de imagem que uniformizam a luminosidade interior não produzem resultados muito diferentes dos das imagens originais, no processo de detecção automática de pontos homólogos. Uma vez que imagens processadas com algoritmos diferentes conduziram a resultados semelhantes e, depois do tratamento as imagens vizinhas ficaram, visualmente, mais próximas em termos de radiometria; conclui-se que o maior problema para a realização da triangulação automática não são as diferenças radiométricas que existem entre as imagens. O problema radiométrico mais grave das imagens do voo RAF47 e que impede a correcta identificação dos pontos homólogos é a indefinição dos objectos representados.

Um dos maiores problemas do trabalho realizado foi a inexistência de certificado de calibração. As experiências efectuadas com as várias combinações possíveis de orientação da câmara, primeira marca e sentido da medição permitiram determinar a forma correcta de medição, a qual poderá ser utilizada para orientar internamente quaisquer imagens do voo RAF47, em trabalhos futuros. Nestes projectos, também o programa de detecção automática

das marcas fiduciais poderá ser usado. Este permite a orientação automática de 48% das imagens, o que representa um número significativo de fotografias em projectos de grandes dimensões.

Devido aos problemas provenientes da triangulação automática, a triangulação aérea por feixes perspectivivos com parâmetros adicionais e auto-calibração não permitiu orientar as imagens com a precisão desejada. Contudo, a análise dos resultados provenientes da triangulação e os dados obtidos no controlo de qualidade indicam que os parâmetros de orientação externa obtidos podem ser utilizados para a aquisição de produtos fotogramétricos com escala inferior a 1:35000, o que é bastante aceitável para fotografias originalmente à escala 1:30000. No caso de se pretender obter uma ortofotocarta, a partir das fotografias do RAF47, é preciso ter em atenção que os dados altimétricos não têm qualidade suficiente para construir um modelo digital do terreno, que possa ser utilizado para a obtenção da ortofotocarta. Uma possível solução para este problema é, para uma zona onde não se tenham verificado grandes alterações altimétricas, utilizar um modelo digital do terreno actual.

Foi construída uma base de dados foto-geográfica, que reúne toda a informação adquirida ao longo dos 12 meses de duração do trabalho realizado. Esta base de dados permite a realização de diversas consultas, as quais facilitarão o trabalho de investigadores que utilizem as imagens trabalhadas, não só porque esta base de dados reúne toda a informação que estes necessitam, mas também porque é fácil encontrar rapidamente aquilo que se procura.

Trabalhar com fotografias aéreas destinadas a serem orientadas em aparelhos analógicos e que, provavelmente, não foram obtidas para fins cartográficos, utilizando estações fotogramétricas digitais, não é uma tarefa fácil, uma vez que as fotografias não obedecem a diversos padrões que são considerados na aquisição das fotografias actuais e que são tidos em conta pelos programas de triangulação (por exemplo, as coordenadas foto calibradas das marcas fiduciais). Para além deste obstáculo de difícil transposição, as fotografias do RAF47 em conjunto com os dados adquiridos para a triangulação, como os pontos fotogramétricos, apresentam várias das características que dificultam a aquisição de resultados óptimos.

Apesar das dificuldades encontradas ao longo do trabalho, foi possível reunir um conjunto de informações importantes sobre o voo e obter resultados aceitáveis para os parâmetros numéricos, tendo em conta a qualidade das imagens.

7. Referências

- Alves, M. P. F. (1950a). *Relatório dos Serviços Cartográficos do Exército – 1949*. Texto não publicado, Instituto Geográfico do Exército, Lisboa.
- Alves, M. P. F. (1950b). *Relatório dos Serviços Cartográficos do Exército – 1950*. Texto não publicado, Instituto Geográfico do Exército, Lisboa.
- American Society of Photogrammetry (1944). “Manual of Photogrammetry”, Preliminary Edition, American Society of Photogrammetry, New York, United States of America.
- American Society of Photogrammetry (1952). “Manual of Photogrammetry”, 2nd Edition, American Society of Photogrammetry, Washington, D. C., United States of America.
- American Society of Photogrammetry (1960). “Manual of Photographic Interpretation”, 1st Edition, American Society of Photogrammetry, Washington, D. C., United States of America.
- American Society of Photogrammetry (1980). “Manual of Photogrammetry”, 4th Edition, American Society of Photogrammetry, Falls Church, United States of America.
- Apostol, T. M. (1985). “Cálculo – Volume 1”, 2^a Edição, Editora Reverté, Ltda, Barcelona.
- Barrass, M. B. (2007). *Air of Authority – A History of RAF Organisation*, United Kingdom (disponível em <http://www.rafweb.org/SqnMark058-59.htm>, acessado em 2009).
- Bethel, J. (1997). *Least Squares Image Matching for CE604*. Purdue University, West Lafayette, United States of America (disponível em <http://cobweb.ecn.purdue.edu/~bethel/main1.pdf>, acessado em 2009).

- Butler County Warbirds (2009). *Sherman Mills Fairchild*, Butler County Warbirds, Inc., Fairfield, Ohio, United States of America (disponível em http://www.bcwarbirds.com/sherman_fairchild_bio.htm, acessado em 2009)
- Dörstel, O. C., M. L. Tang, H. M. Madani (2001). *Automatic Aerial Triangulation Software of Z/I Imaging*. Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart (disponível em <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo01/Doerstel.pdf>, acessado em 2009).
- Ebner, H. (1976). *Self-Calibrating Block Adjustment*. XIII Congress of the International Society for Photogrammetry Helsinki 1976, Invited Paper of Commission III, Helsinki.
- Evidence in Camera (1945). *Special Edition on Photographic Reconnaissance and Photographic Intelligence 1939 – 1944*, March 1945, Air Ministry A.C.A.S. Great Britain.
- Fisher, R., S. Perkins, A. Walker, E. Wolfart (2003a). *Intensity Histogram*. School of Informatics, The University of Edinburgh, Scotland, United Kingdom (disponível em <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/histogram.htm>, acessado em 2009).
- Fisher, R., S. Perkins, A. Walker, E. Wolfart (2003b). *Opening*. School of Informatics, The University of Edinburgh, Scotland, United Kingdom (disponível em <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/open.htm>, acessado em 2009).
- Fisher, R., S. Perkins, A. Walker, E. Wolfart (2003c). *Structuring Elements*. School of Informatics, The University of Edinburgh, Scotland, United Kingdom (disponível em <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/strctel.htm>, acessado em 2009).
- Fisher, R., S. Perkins, A. Walker, E. Wolfart (2003d). *Erosion*. School of Informatics, The University of Edinburgh, Scotland, United Kingdom (disponível em <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/erode.htm>, acessado em 2009).

- Fisher, R., S. Perkins, A. Walker, E. Wolfart (2003e). *Dilation*. School of Informatics, The University of Edinburgh, Scotland, United Kingdom (disponível em <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/dilate.htm>, acessado em 2009).
- Fisher, R., S. Perkins, A. Walker, E. Wolfart (2003f). *Thresholding*. School of Informatics, The University of Edinburgh, Scotland, United Kingdom (disponível em <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/threshld.htm>, acessado em 2009).
- Fisher, R., S. Perkins, A. Walker, E. Wolfart (2003g). *Gaussian Smoothing*. School of Informatics, The University of Edinburgh, Scotland, United Kingdom (disponível em <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/gsmooth.htm>, acessado em 2009).
- Graves, M. and B. G. Batchelor (2003). “Machine Vision for the Inspection of Natural Products”, Springer (disponível em <http://books.google.pt/books?id=PXwz4MDckYsC&pg=PA55&dq=euler+number+binary+images#v=onepage&q=euler%20number%20binary%20images&f=false>, acessado em 2009).
- George Eastman House (2009). *Gelatin on Nitrocellulose Sheet Film Negative*, George Eastman House, United States of America (disponível em http://notesonphotographs.eastmanhouse.org/index.php?title=Gelatin_On_Nitrocellulose_Sheet_Film_Negative, acessado em 2009).
- Gruber, O. v. (1931). “*Traité de Photogrammétrie Aérienne et Terrestre*”, Edition Française, Editions La Concorde, Lausanne, France.
- Intergraph Corporation (2008). *Manual do ISAT*, Intergraph Corporation, Madison, United States of America.
- Leal, A. G. L. C. (1948). *Relatório dos Serviços Cartográficos do Exército – 1947*. Texto não publicado, Instituto Geográfico do Exército, Lisboa.
- Mather, P. M. (1999). “*Computer Processing of Remotely-Sensed Images*”, 2nd Edition, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England.

- McHugh, S. T. (2005). *Camera Histograms: Tones & Contrast* (disponível em <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/histograms1.htm>, acessado em 2009).
- Mendes, V. B. (2005). *Observações em Ciências Geográficas: Métodos de Ajustamento e Análise*. Texto não publicado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Mera, A. C. (1942). *Fotografia Aérea*, Revista do Ar, N.º 63.
- Northstar Gallery (2005). *Aviation and Aerial Photography – A Brief History of Aerial Photography* (disponível em <http://northstargallery.com/aerialphotography/History%20Aerial%20Photography/history.htm>, acessado em 2009).
- Owens, R. (1997). *Stereo Matching*. School of Informatics, The University of Edinburgh, Scotland, United Kingdom (disponível em http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/OWENS/LECT11/nod e5.html, acessado em 2009).
- Quantitative Imaging Group (2009a). *Histogram-Based Operations*. Faculty of Applied Sciences, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands (disponível em <http://www.ph.tn.tudelft.nl/Courses/FIP/noframes/fip-istogram.html>, acessado em 2009).
- Quantitative Imaging Group (2009b). *Morphology-Based Operations*. Faculty of Applied Sciences, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands (disponível em <http://www.ph.tn.tudelft.nl/Courses/FIP/noframes/fip-Morpholo.html>, acessado em 2009).
- Quantitative Imaging Group (2009c). *Segmentation*. Faculty of Applied Sciences, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands (disponível em <http://www.ph.tn.tudelft.nl/Courses/FIP/noframes/fip-Segmenta.html>, acessado em 2009).

- RAF (2004). *No. 58 Squadron*, Royal Air Force, United Kingdom (disponível em <http://www.raf.mod.uk/bombercommand/h58.html>, acessado em 2009).
- RAF (2009). *Royal Air Force History - de Havilland Mosquito - 60th Anniversary*, Royal Air Force, United Kingdom (disponível em http://www.raf.mod.uk/history_old/mosquito1.html, acessado em 2009).
- Redweik, P. (2005). “Fotogrametria Analítica”, 2ª Edição, Abdul’s Angels / A. E. F. C. U. L., Lisboa.
- Redweik, P. (2007). “Fotogrametria Aérea”, 1ª Edição, Abdul’s Angels / A. E. F. C. U. L., Lisboa.
- Redweik, P., D. Roque, A. Marques, R. Matildes, F. Marques (2009). *Recovering Portugal Aerial Images Repository*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXVIII – 1 – 4 – 7 / W5. ISSN 1682-1777.
- Remote Sensing and Photogrammetry Society (2008). *National Monument Record (NMR)*. Remote Sensing and Photogrammetry Society, London (disponível em <http://www.rspoc.org/information-zones/signs/national-association-of-aerial-photographic-libraries/resources/>, acessado em 2008).
- Sabbatini, R. M. E. (1995). *Um Programa para o Cálculo da Acurácia, Especificidade e Sensibilidade de Testes Médicos*. Núcleo de Informática Biomédica da Universidade Estadual de Campinas, Revista Informédica, 2 (12): 19-21 (disponível em <http://www.informaticamedica.org.br/informed/sensib.htm>, acessado em 2009).
- Schwidefsky, K. (1943). “Fotogrametría Terrestre y Aérea”, 3ª Edición, Editorial Labor, S.A., Barcelona.
- Servicio Geográfico del Ejército (1953). “Curso de Interpretation Fotografica”, 1ª Edição, Servicio Geográfico del Ejército, Escuela de Geodesia y Topografía, Madrid.

The MathWorks™ (2008). *Image Processing Toolbox – Documentation*. The MathWorks™, Natick, Massachusetts, United States of America (disponível em <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/images/index.html?/access/helpdesk/help/toolbox/images/> , acedido em 2008).

Wang and Madani. *Automatic Detection of Shadow Points in Digital Images for Automatic Triangulation*. (disponível em <http://www.isprs.org/new/congresses/istanbul2004/comm3/papers/247.pdf>, acedido em 2009).

Whittier College (2007). *The Fairchild Story*, Whittier College, Whittier, California, United States of America (disponível em <http://web.whittier.edu/fairchild/home.html>, acedido em 2009).

Wolf, P. R. (1974). “Elements of Photogrammetry”, International Student Edition, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd, New York, United States of America.