

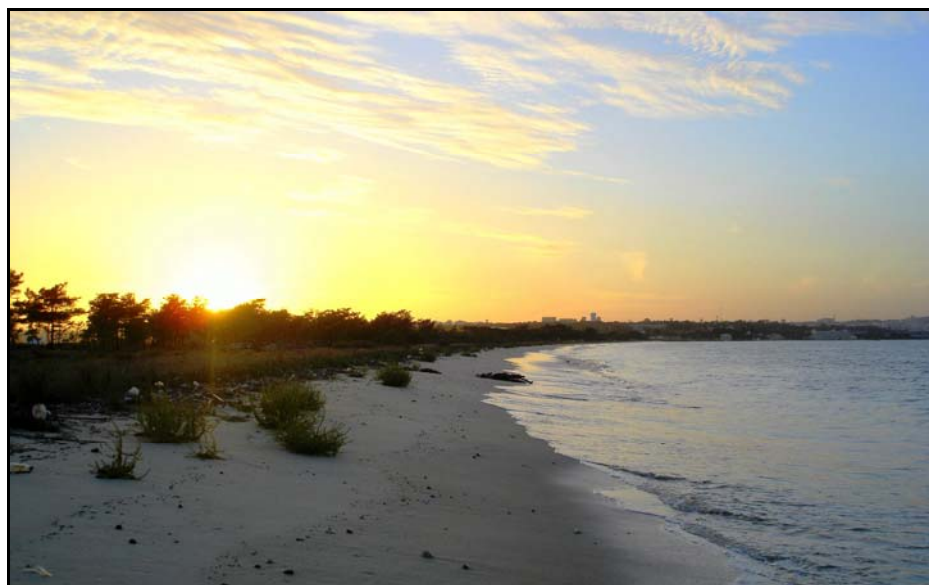
UNIVERSIDADE DE LISBOA - FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Vídeo-Monitorização

aplicada ao estudo da morfodinâmica de praias



Ana Maria Almeida Nobre Silva

Mestrado em Geologia

(Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território)

2007

UNIVERSIDADE DE LISBOA - FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Vídeo-Monitorização

aplicada ao estudo da morfodinâmica de praias

Ana Maria Almeida Nobre Silva

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, para obtenção do Grau de Mestre em Geologia, na especialidade Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território, sob orientação do Prof. Doutor Rui Pires Matos Taborda e do Prof. Doutor João Carlos da Costa Catalão Fernandes.

2007

Resumo

Este trabalho teve como principal objectivo o desenvolvimento de um **sistema de vídeo-monitorização** aplicável ao estudo da morfodinâmica de praias. Este tipo de sistema visa complementar os instrumentos de monitorização actualmente utilizados, apresentando vantagens evidentes em estudos em que é necessário monitorizar extensas zonas costeiras (de ordem quilométrica) durante períodos de tempo relativamente alargados (de ordem plurianual).

O desenvolvimento do sistema de vídeo-monitorização compreendeu uma fase de **calibração** das câmaras de vídeo/fotográficas, na qual foram determinados os respectivos parâmetros intrínsecos. A partir do conhecimento destes parâmetros as imagens foram corrigidas, em *software* desenvolvido no âmbito deste trabalho, tendo-se obtido para todos os tipos de câmaras utilizadas imagens com distorções praticamente negligenciáveis.

Seguiu-se a fase de **rectificação** na qual as imagens oblíquas foram transformadas em imagens equivalentes verticais. Esta transformação foi efectuada a partir do conhecimento dos parâmetros de orientação externa da câmara, determinados a partir dos pontos de controlo no terreno.

Posteriormente estes procedimentos foram integrados de forma a constituírem um sistema de vídeo-monitorização autónomo que, aproveitando as recentes inovações tecnológicas das câmaras de videovigilância aliadas os conceitos da fotogrametria terrestre, pudesse ser aplicável em estudos da morfodinâmica de praias.

O sistema desenvolvido foi testado através de uma aplicação prática que consistiu na realização de um levantamento topo-batimétrico, da zona intertidal, na Praia do Alfeite. A comparação entre os resultados obtidos através da utilização do sistema de vídeo-monitorização e das técnicas de levantamento clássicas revelaram resultados muito favoráveis (com um erro quadrático médio vertical na ordem de 0.08 m tendo sido o máximo, 0.15 m, determinado a 390 m de distância à câmara).

Palavras-Chave: Vídeo-monitorização; morfodinâmica de praias; linha de costa; fotogrametria; rectificação; calibração.

Abstract

The present work had as main objective the development of a **video-monitoring system** applicable to beach morphodynamic study. This system aims to complement the actually used monitoring tools, with clear advantages in the study of extent coastal zones (of kilometers) in large periods of time (several years).

The development of a video-monitoring system involved a video/photo camera **calibration** step, where the internal camera parameters were determined. Through the knowledge of the internal parameters the images were corrected, in software developed in the scope of the present work, resulting negligible distortions in the images acquired with all types of cameras used.

Afterward in the **rectification** step the oblique images were transformed into vertically equivalent images. This transformation was based on the external camera orientation parameters obtained through the ground control points.

Subsequently these two steps were integrated in an autonomous video-monitoring system in which the recent technologic advance of surveillance cameras was connected with the terrestrial photogrammetry concepts in order to apply this system in beach morphodynamic studies.

The developed video-monitoring system was tested through a practical application with a topobathymetric survey, of the intertidal area in Alfeite Beach. The comparison of the video-monitoring system results and the classic survey techniques results show very encouraging results (vertical root mean square of 0.08 m with a maximum value, 0.15 m, at 390 m distance of the camera).

Key- Words: Video-monitoring; beach morphodynamic; coastline; photogrammetry; rectification; calibration.

Índice

Resumo	i
<i>Abstract</i>	ii
Índice	iii
Índice de figuras	v
Índice de tabelas	x
Agradecimentos	xi
1 Introdução	1
1.1 Vídeo-Monitorização aplicada aos sistemas costeiros	1
1.1.1 Estado actual dos conhecimentos	2
1.1.2 Princípios geométricos da fotogrametria	6
1.2 Objectivos	8
1.3 Conteúdo da tese	9
2 Calibração	11
2.1 Introdução	11
2.1.1 Objectivos deste capítulo	11
2.1.2 Estrutura do capítulo de Calibração	12
2.2 Fundamentos teóricos	12
2.3 Calibração laboratorial	16
2.4 Correção de imagens	22
2.5 Discussão	25
3 Rectificação	29
3.1 Introdução	29
3.1.1 Objectivos deste capítulo	29
3.1.2 Estrutura do capítulo de Rectificação	30
3.2 Orientação externa	30
3.2.1 <i>Software</i> para orientação externa	32
3.3 Rectificação	35
3.3.1 <i>Software</i> para rectificação de imagem	40

3.3.2	Ortorrectificação	43
3.4	Discussão.....	46
4	Aplicação	49
4.1	Introdução.....	49
4.1.1	Objectivos deste capítulo.....	51
4.1.2	Estrutura do capítulo Aplicação.....	51
4.2	Aquisição de dados	52
4.2.1	Características da câmara de vídeo-monitorização	52
4.2.2	Aquisição de dados	53
4.3	Orientação externa da câmara	59
4.4	Rectificação de imagens	61
4.5	Levantamento topo-batimétrico da zona entre marés	63
4.6	Discussão.....	67
5	Conclusões e Considerações finais.....	71
6	Referências.....	75
7	Anexos	81
7.1	Anexo A – Níveis de maré para as diferentes posições do transdutor	81
7.2	Anexo B – Imagens rectificadas de 10 em 10 minutos.....	83

Índice de figuras

Introdução

- Figura I. 1 – Praia da Ágata no Estado de Oregon, Estados Unidos. O rectângulo a tracejado corresponde à área de estudo do primeiro sistema ARGUS (Holman et al., 1993).3
- Figura I. 2 - Imagem timex (imagens temporais com exposição de 10 minutos) da zona de rebentação da Praia da Ágata. As bandas brancas representam as zonas preferenciais de rebentação sobre barras arenosas submarinas ou sobre a linha de costa. As zonas mais escuras correspondem a canais mais profundos. (A) corresponde a uma imagem oblíqua da praia enquanto (B) corresponde à imagem da área rectangular em A, rectificada mostrando uma perspectiva central da morfologia retratada (Holman et al., 1993).4
- Figura I. 3 – Condição de colinearidade (Wolf & Dewitt, 2000).7
- Figura I. 4 – Rotação sequencial dos 3 ângulos de rotação da imagem relativamente ao sistema de coordenadas do terreno (Wolf & Dewitt, 2000).8
- Figura I. 5 – Representação das fases envolvidas no desenvolvimento do sistema de vídeo-monitorização, f^l é definida pelo modelo de distorção (determinado na fase de calibração da câmara) e g^l pelas equações de colinearidade..... 10

Calibração

- Figura II. 1- Exemplo do efeito da distorção radial (negativa), num padrão inicialmente homogéneo. 13
- Figura II. 2- Exemplo do efeito da distorção tangencial, num padrão inicialmente homogéneo 14
- Figura II. 3 – Padrão de calibração da câmara, fornecido com o software de calibração “*Camera Calibration Toolbox for Matlab*”. 16
- Figura II. 4 – Aspecto da instalação da câmara de vídeo para a aquisição de imagens do padrão de calibração..... 17
- Figura II. 5 – Exemplos de diferentes perspectivas de aquisição de imagem. 17
- Figura II. 6 – Imagem adquirida pela câmara de vídeo, onde é claramente perceptível a distorção radial. 18
- Figura II. 7 – Menu principal da *Toolbox* de Calibração de Câmaras para Matlab. 18
- Figura II. 8 – Imagens de diferentes ângulos para calibração da câmara. 18
- Figura II. 9 – Extracção dos vértices do padrão (a esquerda representa a localização dos cantos da grelha necessários à extracção dos restantes vértices do padrão automaticamente, imagem direita). 19

Figura II. 10- Resultados da calibração da câmara através da <i>Toolbox</i> de Calibração para Matlab.....	19
Figura II. 11 – Componente radial (esquerda) e tangencial (direita) do modelo de distorção.	20
Figura II. 12- Modelo de distorção completo, incluído a distorção radial e tangencial.	21
Figura II. 13- Análise espacial do erro ao longo de uma imagem de calibração (à esquerda) e a re-projecção do erro de todas as imagens (direita).	22
Figura II. 14 – Distribuição espacial das imagens de calibração relativamente à posição da câmara (imagem da esquerda) e posições da câmara relativamente a uma imagem fixa (imagem da direita).	22
Figura II. 15 – Diagrama que ilustra o procedimento utilizado no mapeamento inverso. O <i>input space</i> representa a imagem distorcida (u, v), o <i>output space</i> a imagem sem distorção (x, y) e T^{-1} é a função definida pelo modelo de distorção (equivalente a f^{-1} na Figura I.5) (retirado de: Matlab Central, 2007).....	24
Figura II. 16 – Imagem do padrão de calibração corrigida.....	25
Figura II. 17 – Resultados da calibração da câmara, não considerando as distorções induzidas pela câmara.....	27
Figura II. 18 – Modelo de distorção completo para a câmara fotográfica Kodak dx6490.....	27
Figura II. 19 – Modelo de distorção completo para a câmara fotográfica Sony p100.....	28

Rectificação

Figura III. 1 – Rotação sequencial do plano de imagem (posição da câmara) no sistema de rotação ω, ϕ e κ em que a rotação se efectua segundo a ordem de eixos x, y e z (Wolf & Dewitt, 2000).	31
Figura III. 2 – Representação dos GCP numa imagem corrigida dos efeitos de distorção. Exemplo da localização da linha de costa na Lagoa de Albufeira (Silva et al., 2007).....	33
Tabela III. 1 – Exemplo da relação entre coordenadas dos pontos de controlo (GCP) no sistema de coordenadas imagem (x e y) e terreno (X, Y e Z) na Lagoa de Albufeira.	33
Figura III. 3 – Figura ilustrativa dos desvios devidos ao relevo.....	36
Figura III. 4 – Magnitude dos desvios (em metros) relativamente ao desnível topográfico e à distância radial à câmara, para uma altitude fixa da câmara de 100 m	37
Figura III. 5 – Representação esquemática da resolução ou dimensão espacial do pixel, segundo a componente transversal (Δ_c) e longitudinal (Δ_r).	38
Figura III. 6 – Dimensão espacial do pixel (em metros), segundo a componente transversal, i.e. segundo o eixo x da imagem.....	39

Figura III. 7 - Dimensão espacial do pixel (em metros), segundo a componente longitudinal, i.e. segundo o eixo y da imagem.....	39
Figura III. 8 – Diagrama que ilustra o procedimento utilizado no mapeamento inverso. Neste caso o <i>input space</i> representa a imagem corrigida, o <i>output space</i> a imagem rectificadada e T^{-1} as equações de colinearidade (retirado de: Matlab Central, 2007).....	41
Figura III. 9 – Parâmetros de rectificação utilizados no exemplo da Lagoa de Albufeira.....	41
Figura III. 10 – Imagem rectificadada da Lagoa de Albufeira, utilizando como nível de referência o nível de água medido no interior da laguna.	42
Figura III. 11 - Imagem corrigida utilizando o nível de água da laguna, com a implementação dos pontos levantados com DGPS.....	43
Figura III. 12 – Imagem ortorrectificadada através da introdução, no <i>software</i> de rectificação, do modelo digital de terreno da barra arenosa da Lagoa de Albufeira, adquirido durante a campanha de campo.	44
Figura III. 13 - Imagem corrigida utilizando o MDT, com a implementação dos pontos levantados com o DGPS.....	45

Aplicação

Figura IV. 1- Princípio para o mapeamento da topo-batimetria da zona entre marés (adaptado de Aarninkhof, 2003).....	49
Figura IV. 2 – Exemplo de imagem Instantânea (<i>Snap-shot image</i>) (Van Rijn, 2007).....	50
Figura IV. 3 – Exemplos de imagem temporal (<i>timex image</i>) à esquerda e imagem de variância (<i>variance image</i>) à direita (Van Rijn, 2007).....	51
Figura IV. 4 – Enquadramento geográfico da praia do Alfeite no Estuário do Tejo.....	53
Figura IV. 5- Instalação da câmara de vídeo obliquamente à praia, num local elevado.....	54
Tabela IV. 1- Resultados da referenciação dos pontos de controlo e respectivos desvios padrão.	55
Figura IV. 6 – Levantamento topográfico com GPS dos pontos de controlo (GCP), necessários à rectificação das imagens.....	55
Figura IV. 7 – Localização do GPS na imagem corrigida de modo a definir um ponto de controlo (GCP) nessa posição.	56
Figura IV. 8 – Imagem corrigida dos efeitos de distorção da lente, com a localização dos GCP coordenados (a vermelho).	56
Tabela IV. 2 – Tabela de coordenadas dos pontos de controlo (GCP) no sistema de coordenadas imagem (x e y) e terreno (X, Y e Z) no sistema de coordenada <i>Hayford Gauss Datum</i> Lisboa (coordenadas militares).....	57

Figura IV. 9- Levantamento topográfico da área visível nas imagens com recurso a uma estação total.	57
Figura IV. 10 – Localização dos perfis topográficos transversais levantados com estação total, a imagem de fundo corresponde a uma imagem da praia do Alfeite rectificada.....	58
Figura IV. 11- Transdutor de pressão colocado dentro de água para a determinação do nível de maré.....	59
Figura IV. 12 – Variação do nível de maré durante a aquisição de imagens. Os níveis de maré encontram-se referenciados ao nível médio do mar e corrigidos da pressão atmosférica.	59
Figura IV. 13 – Resultados da orientação externa obtidos com a totalidade dos GCP, à esquerda os resultados para a posição e orientação da câmara e à direita o erro quadrático médio e o número de iterações necessárias para convergir para o resultado.	60
Figura IV. 14 – Detalhes do erro associado a cada um dos GCP.....	60
Figura IV. 15 - Resultados da orientação externa da câmara durante a aquisição de imagens na praia do Alfeite.	61
Figura IV. 16 – Registo de maré com os níveis de referência (nmm) utilizados para a rectificação das imagens de 10 em 10 minutos.....	61
Figura IV. 17- Imagem corrigida dos efeitos de distorção da lente, adquirida quando o nível de maré se encontrava a cerca de 0.6 m, relativamente ao nível médio do mar.	62
Figura IV. 18 – Menu de definição dos parâmetros de rectificação das imagens.	62
Figura IV. 19 – Imagem rectificada para o nível de maré 0.6 m (nmm).....	63
Figura IV. 20 – Linhas de contorno para os diferentes níveis de maré, de 10 em 10 minutos.	64
Figura IV. 21 – Modelo digital de terreno da zona entre marés, criado a partir das linhas de contorno.....	64
Figura IV. 22- Perfis topográficos à distância de 390 m e 250 m da câmara (à esquerda e direita, respectivamente).....	65
Figura IV. 23 - Perfis topográficos à distância de 210 m e 170 m da câmara (à esquerda e direita, respectivamente).....	65
Figura IV. 24 - Perfis topográficos à distância de 150 m e 130 m da câmara (à esquerda e direita, respectivamente).....	65
Figura IV. 25 - Perfis topográficos à distância de 110 m e 100 m da câmara (à esquerda e direita, respectivamente).....	65
Figura IV. 26 - Perfis topográficos à distância de 90 m e 80 m da câmara (à esquerda e direita, respectivamente).....	66

Figura IV. 27 - Perfis topográficos à distância de 75 m e 70 m da câmara (à esquerda e direita, respectivamente).....	66
Figura IV. 28 - Perfis topográficos à distância de 50 m da câmara.	66
Figura IV. 29 – Erro quadrático médio entre os perfis topográficos obtidos pelo levantamento de campo e pelas linhas de contorno, ao longo da área estudada.....	67
Figura IV. 30 – Distribuição do erro quadrático médio em função da distância à câmara....	67
Figura IV. 31 – Dimensão espacial do pixel segundo as direcções adoptadas no sistema de coordenadas terreno. As isolinhas a cheio representam a dimensão espacial do pixel segundo a componente longitudinal (Δy) e as isolinhas a tracejado representam a dimensão espacial do pixel segundo a componente transversal (Δx) relativamente ao sistema de coordenadas terreno.....	70

Índice de tabelas

Rectificação

Tabela III. 1 – Exemplo da relação entre coordenadas dos pontos de controlo (GCP) no sistema de coordenadas imagem (x e y) e terreno (X, Y e Z) na Lagoa de Albufeira.....	33
--	----

Aplicação

Tabela IV. 1- Resultados da referenciação dos pontos de controlo e respectivos desvios padrão.	55
Tabela IV. 2 – Tabela de coordenadas dos pontos de controlo (GCP) no sistema de coordenadas imagem (x e y) e terreno (X, Y e Z) no sistema de coordenada <i>Hayford Gauss Datum</i> Lisboa (coordenadas militares).	57

Agradecimentos

A realização deste trabalho foi para mim um grande desafio com o qual aprendi muito e que me deu muito prazer em realizar. Neste sentido gostaria de agradecer às pessoas que de alguma forma influenciaram a realização desta dissertação, o meu sincero Muito Obrigada a todos.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus orientadores Prof. Doutor Rui Taborda e Prof. Doutor João Catalão pelo apoio e acompanhamento, sem os quais esta dissertação não seria possível.

Um especial obrigado ao Rui Taborda por acreditar em mim, por todo o apoio e amizade sem os quais, estes dois anos de trabalho não teriam sido tão estimulantes e enriquecedores.

Gostaria também de expressar os meus agradecimentos à Paula Freire pela amizade e simpatia e naturalmente ao projecto Berna (Beach Evolution in Areas of Restricted Fetch: Experimental and Numerical Analysis), financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (contrato POCTI/CTA/45432/2002), pelo financiamento do equipamento e da bolsa de investigação da qual fui bolseira.

Não queria deixar de agradecer ao LATEX-IDL pelas condições de acolhimento proporcionadas, essenciais ao bom desenvolvimento deste trabalho.

Deixo também uma palavra de agradecimento aos Professores Conceição Freitas e César Andrade pela colaboração e apoio na Campanha de Campo na Lagoa de Albufeira inserido no programa de Curso Pós-graduado de especialização em Geologia Aplicada da colega Ana Mafalda Lopes, a quem eu agradeço a ajuda e companhia nas campanhas de campo. Obrigada pela preciosa colaboração do Carlos Antunes no levantamento topográfico com DGPS e do João Francisco Duarte pelo apoio logístico e pelo gerador.

Aos meus queridos colegas da FCUL Rute, Sandra, Tânia, Alexandra, Anabela, Paula, Telmo e Pedro, pelos almoços divertidos e pela alegria, apoio, amizade e carinho que sempre demonstraram.

A Tanya Silveira pela sua permanente disponibilidade em ajudar, à Célia Lee pela enorme força que transmite.

Aos meus eternos colegas e grandes amigos, que embora longe estão sempre perto André Remédio e Liliane Pocinho.

Aos meus pais pelo apoio e incentivo que sempre me deram em todos os momentos;

Um especial obrigado aos meus maninhos que eu tanto adoro e dos quais eu muito me orgulho;

Aos meus sobrinhos João, Gonçalo, André e pelos óptimos momentos de videojogos que partilhámos juntos e ao recém-chegado Gabriel;

Ao Daniel pelo apoio, pela paciência, pelo amor e por tudo.

Introdução

1.1 Vídeo-Monitorização aplicada aos sistemas costeiros

O estudo dos processos actuantes sobre a zona costeira tem vindo a merecer crescente atenção ao longo dos últimos anos, não só devido à sua importância socioeconómica mas também ao facto de constituir um sistema dinâmico complexo, cuja compreensão e previsão constitui ainda um enorme estímulo científico. A caracterização do sistema costeiro conta com uma grande variedade de ferramentas de aquisição de dados no sentido de alcançar um amplo conhecimento da sua dinâmica bem como para contribuir para o desenvolvimento e/ou melhoramento dos modelos de previsão. A detecção remota, a comparação cartográfica, os levantamentos de campo com a aquisição *in situ* de dados morfológicos, sedimentológicos, meteorológicos, de agitação marítima, entre outros, são exemplos de ferramentas geralmente utilizadas para a caracterização de um determinado sistema costeiro.

A complexidade de processos vai desde acontecimentos a escalas espaciais/temporais curtas, como o tipo de rebentação, a magnitude do espraio das ondas, a posição da zona de rebentação e de barras arenosas, as correntes litorais, a movimentação de Figuras de fundo e lobos de praia (*beach cusps*) até acontecimentos a escalas espaciais/temporais mais amplas como processos de acumulação/erosão persistentes, variações na posição da linha de costa, recuo de arribas e variações do nível médio do mar. A caracterização do sistema litoral fica, desde modo, dependente da escala temporal analisada, sendo que a caracterização do sistema como “um todo” fica dificultada na medida em que medições pontuais não correspondem necessariamente às condições modais do sistema, assim como evoluções em larga escala poderão dever-se tanto a um acontecimento pontual como à integração de vários acontecimentos persistentes ao longo do tempo.

O desenvolvimento de sistemas de vídeo-monitorização teve por base o facto de grande parte dos fenómenos que ocorrem no sistema litoral poderem ser visualmente discernidos e quantificados através de processamento de imagem (Holland et al., 1997; Aarninkhof, 2003; Holman & Stanley, 2007), nomeadamente no caso da rebentação das ondas visivelmente perceptível na zona litoral (Holman et al., 1993). A vídeo-monitorização do litoral surgiu para dar resposta às necessidades de monitorizar o litoral com uma resolução espacial/temporal mais adequada (escalas temporais na ordem dos anos e espaciais na ordem dos quilómetros) para o conhecimento efectivo da zona costeira (Davidson et al., 2007) contribuindo assim para o conhecimento científico e também para uma correcta e consciente gestão do litoral.

A utilização de outros meios de detecção remota (imagens de satélite, fotografias aéreas, LIDAR, etc.) permitem uma cobertura espacial bastante alargada do sistema litoral, no entanto, apresenta bastantes limitações como o caso da resolução temporal insuficiente para uma gestão

eficaz da zona costeira (Davidson et al., 2007), os custos associados à realização de voos fotogramétricos (Oliveira et al., 2006) (no caso da aquisição de fotografias aéreas) e ao equipamento específico necessário. A utilização vídeo-monitorização, incluída nas técnicas de detecção remota, fornece uma abordagem de monitorização automatizada a custos relativamente baixos e que consiste na aquisição de imagens oblíquas da praia de modo contínuo a partir de um local alto como o topo de edifícios, promontórios ou torres (Smith & Bryan, 2007). A vídeo-monitorização, aplicada ao estudo dos processos litorais, trouxe grandes vantagens, no sentido de permitir a aquisição de dados numa vasta gama de escalas espaciais (centímetros a quilómetros) e temporais (segundos a anos) (Holland et al., 1997), possibilitando a aquisição de dados em condições adversas, como o caso da caracterização pré e pós-temporal da praia (Smith & Bryan, 2007), principais responsáveis pelas modificações no litoral e cuja escassez de dados é dominante.

1.1.1 Estado actual dos conhecimentos

A utilização de imagem vídeo, aplicadas ao estudo dos processos litorais, remonta aos anos 40, com a utilização de fotografias aéreas (in: Van Rijn, 2007). Nos anos 60 e 70, a determinação de padrões de correntes litorais efectuou-se com câmaras fotográficas montadas em sistemas motorizados e com a utilização de imagens em estereoscopia, resultantes da utilização de múltiplas câmaras colocadas em balões (Sonu C., 1969 e Sasaki et al., 1976 in Redondo et al., 1994). Redondo et al. (1994) referem também que as primeiras aplicações de fotogrametria terrestre, nomeadamente, utilizadas na determinação de características da rebentação das ondas e correntes longilitorais foram realizadas, nos anos 70, por Maresca & Seibel.

Foi nos anos 80 que se deu o início do grande desenvolvimento das técnicas de vídeo-monitorização, inicialmente com a intenção de alargar os conhecimentos científicos sobre os processos costeiros, investigadores do *Coastal Imaging Laboratory*, da Universidade do estado de Oregon nos Estados Unidos, desenvolveram as técnicas de vídeo e processamento de imagem com o objectivo de monitorizar as modificações costeiras e os processos físicos actuantes sobre o sistema costeiro (Holman et al., 1993). A utilização de novas metodologias de processamento de imagem, como o caso das imagens temporais (*timex images*) que correspondem a uma exposição de 10 minutos de vídeo, permitem a identificação de barras arenosas e canais de retorno submersos de um modo extremamente simples comparativamente com as tradicionais metodologias de levantamento de campo (Van Rijn, 2007). Esta descoberta permitiu a aplicação generalizada da vídeo-monitorização na identificação e quantificação dos mais variados processos morfodinâmicos e o contínuo desenvolvimento de algoritmos cada vez mais complexos para a extracção de informação quantitativa dos sinais observáveis nas imagens (Davidson et al., 2007).

Produto do trabalho desenvolvido pelo *Coastal Imaging Laboratory* foi criado o programa *Argus Beach Monitoring Station* (ARGUS) que consiste numa rede mundial de câmaras instaladas sobre a praia que adquirem informação de natureza quantitativa sobre os processos costeiros de modo contínuo e automático, através de medições horárias de variações morfológicas e hidrodinâmicas,

direccionadas essencialmente para ser uma ferramenta de apoio à gestão da zona costeira. O primeiro sistema ARGUS, utilizando câmaras analógicas a preto e branco, foi instalado na praia da Ágata na costa do Estado de Oregon em 1992 (Figura I.1) para estudar os processos costeiros. O procedimento base, da vídeo-monitorização, consiste numa primeira fase de calibração das lentes das câmaras e na rectificação das imagens que originalmente são oblíquas para uma imagem em perspectiva central (Figura I.2) de modo a que se possam efectuar medições quantitativas relativamente a um sistema de coordenadas do “mundo real” (Holman et al., 1993).



Figura I. 1 – Praia da Ágata no Estado de Oregon, Estados Unidos. O rectângulo a tracejado corresponde à área de estudo do primeiro sistema ARGUS (Holman et al., 1993).

Após o reconhecimento da aplicabilidade e eficácia destes sistemas, as câmaras de vídeo digital montadas sobre a praia estabeleceram-se como um instrumento de recolha de dados relacionados com a morfologia costeira (Holman et al., 1993; Browne et al., 2005), experimentando um período de ascensão do qual resultou a criação de vários sistemas de monitorização do litoral como por exemplo: o sistema *CoastalCOMS* (*Coastal Conditions Monitoring System*), desenvolvido por investigadores da Universidade de Griffith na Austrália, que fornece informação sobre as condições costeiras para o apoio à gestão costeira (Costalwatch, 2007); e o sistema *Erdman Video System* que comercializa uma vasta gama de produtos de análise de imagem digital de câmaras de vídeo para fins científicos, turísticos, de construção e outros (Video monitoring, 2007).

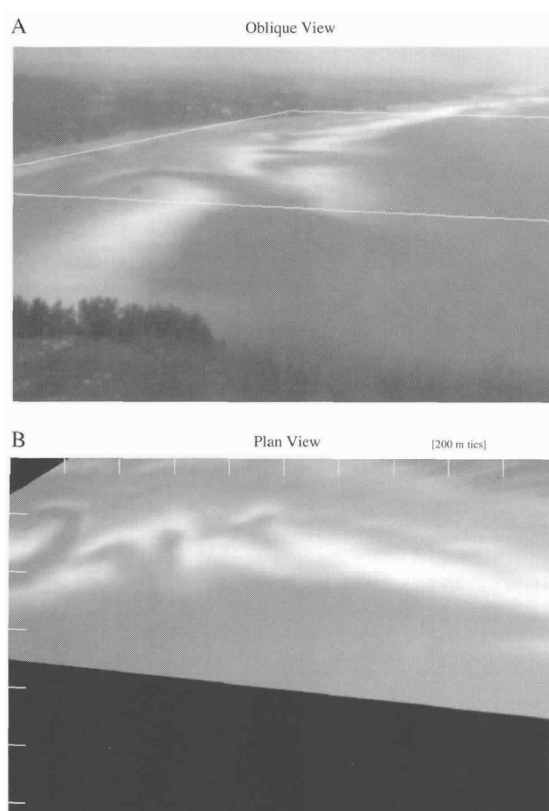


Figura 1. 2 - Imagem timex (imagens temporais com exposição de 10 minutos) da zona de rebentação da Praia da Ágata. As bandas brancas representam as zonas preferenciais de rebentação sobre barras arenosas submarinas ou sobre a linha de costa. As zonas mais escuras correspondem a canais mais profundos. (A) corresponde a uma imagem oblíqua da praia enquanto (B) corresponde à imagem da área rectangular em A, rectificada mostrando uma perspectiva central da morfologia retratada (Holman et al., 1993).

A aplicação destes sistemas abrange o estudo de uma vasta gama de processos físicos da zona costeira (Holman et al., 1993; Holland et al., 1997; Holman, 2005). Por exemplo, a localização e monitorização de barras arenosas submersas (Knicki & Holman, 2000; Van Enckevort & Ruesselink, 2003; Alexander & Holman, 2004; Haxel & Holman, 2004; Quartel et al., 2006; Adams et al., 2007) que se baseia na análise da intensidade luminosa dos pixéis e a sua variação na zona de dissipação de energia das ondas; a localização da zona de rebentação das ondas (Aarninkhof & Ruessink, 2004; Conley et al., 2007) e da zona de espalho (Holland & Holman, 1996; Conley et al., 2007); a identificação de formas de fundo (Doucette et al. 2002), espaçamento de agueiros (Quartel et al., 2006; Turner et al., 2007) e comprimento de onda de lobos de praia (Holland & Holman, 1996; Holland, 1998).

Estes sistemas permitem ainda localizar e avaliar a evolução da posição da linha de costa (Plant & Holman, 1997; Dronkers, 2001; Alexander & Holman, 2004; Armaroli et al., 2004; Conley et al., 2007; Siegle et al., 2007), realizada através da identificação da separação água/terra, geralmente em imagens temporais (*timex images*) ou através da localização da zona de rebentação das ondas;

determinar evolução da morfodinâmica da embocadura de rios (Ciavola et al., 2005) e de barras (Morris et al., 2001; 2004) e monitorizar a dinâmica de canais de navegação (Medina et al., 2007).

A capacidade de delimitar a posição da linha de costa remotamente e de modo simplificado, tornou-se o elemento chave destes sistemas, a partir do qual foi possível efectuar a quantificação topo-batimétrica da zona entre marés através da análise de uma sucessão de imagens adquiridas ao longo de um ciclo de maré, fazendo associar-se a cada delimitação da linha de costa o nível de maré da altura em que foi adquirida (Plant & Holman, 1997; Alport et al., 1998; Dronkers, 2001; Aarninkhof, 2003; Smith & Brayn, 2007), bem como, determinar variações no declive de praia (Madsen & Plant, 2001) e os níveis de maré (Alport et al. 1998; Foote & Horn, 1999; Foote et al., 2002; Benetazzo, 2006).

Alguns aspectos hidrodinâmicos, por serem perceptíveis opticamente, podem também ser alvo de quantificação baseada na análise das imagens adquiridas pelos sistemas de vídeo-monitorização, nomeadamente a velocidade e direcção de espalho das ondas e de correntes litorais (Holman et al., 1993; Redondo et al., 1994; Holland & Holman, 1996; Alport et al., 1998, em experiências laboratoriais; Foote & Horn, 1999; Holland et al., 2001; Foote et al., 2002; Cohen, 2003; Holman, 2005;), essencialmente através do seguimento da espuma resultante da rebentação das ondas, bem como outras características das ondas; a direcção (Curtis et al., 2002; Benetazzo, 2006; Conley et al., 2007) e a velocidade (Benetazzo, 2006).

A quantificação dos processos hidrodinâmicos, bem como outros aspectos morfodinâmicos, através da vídeo-monitorização depende fortemente da visibilidade das ondas e das características das correntes, que por sua vez dependem da resolução do pixel, das condições atmosféricas e do regime de agitação local (Aarninkhof, 2003).

Algumas limitações destes sistemas prendem-se com a incapacidade de receber sinais ópticos durante a noite ou durante condições atmosféricas desfavoráveis, como nevoeiro ou durante chuvas intensas, no entanto fornecem uma grande quantidade de dados de baixo custo, ante e pós-temporal, com possibilidade de adequar a recolha de dados às escalas temporal e espacial mais adequadas às necessidades de amostragem (Holman & Stanley, 2007) e quando comparados com as diferentes técnicas de detecção remota, estes sistemas são considerados por Aarninkhof (2003) como sendo as técnicas de detecção remota mais adequadas para a monitorização dos processos morfodinâmicos na zona costeira a longo prazo e com uma grande resolução.

A elevada obliquidade das imagens confere um decréscimo de precisão com o aumento da distância à câmara (ver Capítulo 3). Segundo, Davidson et al. (2007) a confiança, precisão e versatilidade destes sistemas têm vindo a ser testados ao longo do tempo na vasta literatura científica, estando a chegar-se a um reconhecimento do potencial que os sistemas de vídeo-monitorização têm para a gestão dos sistemas costeiros, por exemplo, Van Koningsveld et al. (2007) referem no seu trabalho, que de um modo geral, os sistemas de vídeo-monitorização costeira demonstraram ser uma ferramenta muito eficaz na gestão costeira e fornecem dados com uma resolução espacial e temporal excelentes.

Em Portugal a utilização destes sistemas no estudo da dinâmica litoral é ainda muito incipiente, devido essencialmente aos custos associados à sua utilização que, embora relativamente baratos face às suas capacidades e potencialidades na aquisição de dados, são ainda de difícil acesso à comunidade científica e aos órgãos de gestão Portugueses. De entre estes realizados em território nacional há a destacar o trabalho efectuado por Morris et al. (2004) que analisou as variações morfológicas sazonais da Barra Nova do Ancão (Algarve) utilizando técnicas de vídeo-monitorização colocadas sobre a barra durante 14 meses. No presente ano, foi ainda publicado um trabalho que decorreu na Praia de Pinheiro da Cruz, no Arco Tróia-Sines, e que consistiu numa rápida caracterização ambiental do sistema litoral através da utilização de vária instrumentação, da qual o sistema de vídeo-monitorização fez parte para adquirir informação adicional sobre aspectos morfológicos da praia submarina, dimensão da zona de surf, localização das correntes litorais e indicações sobre a direcção das ondas incidentes e tipo de rebentação (Conley et al., 2007). No que diz respeito à utilização da vídeo-monitorização no litoral há ainda que referir uma equipa de investigadores do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) que está envolvida na aplicação e no estudo das técnicas de vídeo-monitorização, utilizando o sistema ARGUS, em sistemas costeiros em Espanha (Fachin et al., 2005).

A implementação de um sistema de monitorização em Portugal, capaz de efectuar a quantificação de processos costeiros, a custos reduzidos e de um modo simples e operacional torna-se fundamental para um conhecimento mais alargado dos mecanismos actuantes no litoral e para fornecer informação quantitativa às entidades responsáveis pela gestão do litoral.

1.1.2 Princípios geométricos da fotogrametria

O estudo dos processos costeiros, utilizando sistemas de vídeo-monitorização, tem por base a quantificação e a georreferenciação de diversos aspectos opticamente identificáveis em imagem. Para tal, é fundamental o estabelecimento de uma relação geométrica entre a imagem e o objecto de modo a obter-se informação quantitativa sobre os objectos, estritamente a partir de imagens, sendo este o papel fundamental da fotogrametria (Mikhail et al., 2001), e que se processa através da conversão das coordenadas de imagem x e y (ou u , v , consoante os autores Heikkila & Silvén (1997); Holland et al. (1997); Holland et al. (1997) e Aarninkhof (2003)) em coordenadas de terreno X , Y e Z (ou x , y e z).

Esta relação está perfeitamente estabelecida num dos princípios da fotogrametria, denominado por princípio ou **condição da colinearidade**, que expressa a relação entre a câmara fotográfica, um ponto no terreno e a sua projecção na imagem, sendo que todos eles se encontram dispostos segundo uma recta no espaço tridimensional. A Figura 1.3 representa a condição de colinearidade para uma imagem oblíqua, em que **L** corresponde à posição da câmara, **A** um ponto no terreno e, **a** a representação do ponto A na imagem (Wolf & Dewitt, 2000).

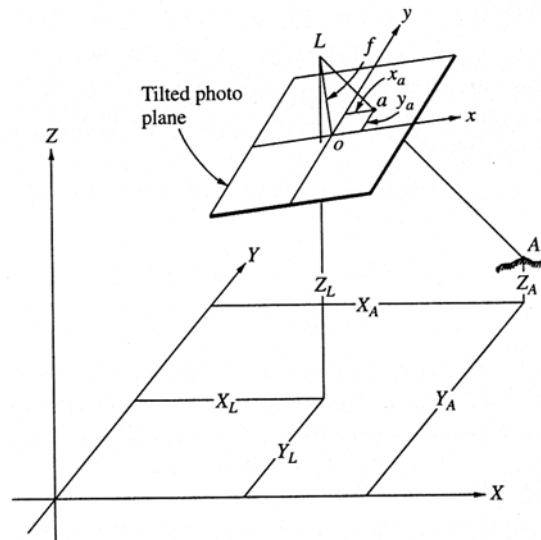


Figura I. 3 – Condição de colinearidade (Wolf & Dewitt, 2000).

As **equações da colinearidade** formam um sistema de duas equações que expressam a condição de colinearidade para qualquer ponto numa imagem: uma equação descreve a transformação associada à coordenada x da imagem e a outra equação descreve a transformação associada à coordenada y da imagem.

$$x_a = x_o - f \left[\frac{m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \right] \quad \text{Equação I. 1}$$

$$y_a = y_o - f \left[\frac{m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \right] \quad \text{Equação I. 2}$$

onde x_a e y_a correspondem a coordenadas do ponto **a** na imagem, sistema de coordenadas da imagem; X_a , Y_a e Z_a correspondem às coordenadas do objecto **A** no sistema de coordenadas do objecto; X_L , Y_L e Z_L representam a posição da câmara, também, no sistema de coordenadas do objecto (ver Figura I.3); f é a distância focal da câmara; x_o e y_o são as coordenadas do ponto principal da imagem; e m 's correspondem aos elementos da matriz rotação em função dos ângulos omega (ω), phi (ϕ) e kappa (κ), segundo os eixos x, y e z (da imagem), respectivamente.

Por convenção os ângulos de rotação, ω , ϕ e κ , são positivos no sentido anti-horário quando observados do lado positivo do eixo respectivo. A sequência de rotação é também definida pela rotação, em primeiro lugar em torno do eixo x, seguindo-se o y e finalmente em torno do eixo z do sistema de coordenadas imagem (Figura I.4).

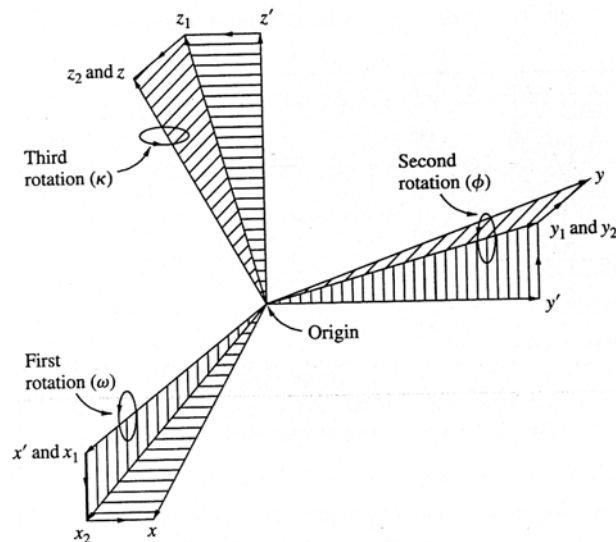


Figura I. 4 – Rotação sequencial dos 3 ângulos de rotação da imagem relativamente ao sistema de coordenadas do terreno (Wolf & Dewitt, 2000).

Os valores dos nove elementos (m 's) envolvidos na rotação são assim definidos em função de três parâmetros independentes, os ângulos de rotação:

$$\begin{aligned}
 m_{11} &= \cos \varphi * \cos k \\
 m_{12} &= \sin \omega * \sin \varphi * \cos k + \cos \omega * \sin k \\
 m_{13} &= -\cos \omega * \sin \varphi * \cos k + \sin \omega * \sin k \\
 m_{21} &= -\cos \varphi * \sin k \\
 m_{22} &= -\sin \omega * \sin \varphi * \sin k + \cos \omega * \cos k \\
 m_{23} &= \cos \omega * \sin \varphi * \sin k + \sin \omega * \cos k \\
 m_{31} &= \sin \varphi \\
 m_{32} &= -\sin \omega * \cos \varphi \\
 m_{33} &= \cos \omega * \cos \varphi
 \end{aligned}$$

A matriz que constitui os elementos da rotação é geralmente designada por matriz rotação (M) e é expressa matricialmente da seguinte forma:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad \text{Equação I. 3}$$

1.2 Objectivos

Este trabalho tem como objectivo fundamental o desenvolvimento de um sistema de vídeo-monitorização e efectuar a sua aplicação a um sistema litoral.

O desenvolvimento do sistema de vídeo-monitorização tem como base a utilização de uma câmara de videovigilância IP (*Internet Protocol*) digital, aproveitando os grandes desenvolvimentos tecnológicos destas câmaras nomeadamente as ferramentas para a aquisição de imagens e

transferência de dados remotamente por *Ethernet* ou RDIS juntamente com a criação de *software* de rectificação das imagens, tendo por suporte os conceitos da fotogrametria terrestre.

Espera-se que este sistema seja capaz de recolher dados de modo automático, e contínuo, adequado à quantificação de diversas morfologias da praia, nomeadamente a localização da zona de rebentação das ondas, avaliação da movimentação de barras submarinas, identificação de variações na posição da linha de costa e recolha de informação topo-batimétricos da zona entre marés pela associação da posição da linha de costa com conhecimento dos níveis de maré. Promovendo, desta forma, o desenvolvimento de um sistema de baixo custo, portátil e de fácil utilização, adequado à quantificação de vários processos costeiros para uma melhor compreensão e previsão da evolução do sistema litoral.

1.3 Conteúdo da tese

Para atingir os objectivos inicialmente propostos foi, numa primeira fase, estudada a problemática da calibração das câmaras de modo a determinar os parâmetros internos da câmara, essenciais para a correcção das distorções provocadas pela lente e para o estabelecimento das relações geométricas entre a imagem e o terreno (Figura 1.5). Esta temática é abordada no Capítulo 2 – Calibração.

O Capítulo 3 (Rectificação) aborda a projecção das imagens com perspectiva oblíquas em imagens em projecção central (equivalente a uma fotografia vertical), bem como a obtenção dos parâmetros de orientação externa da câmara, que juntamente com os parâmetros internos determinados no Capítulo da calibração são essenciais para a rectificação das imagens (Figura 1.5). Neste capítulo é ainda abordada a ortorrectificação (ou rectificação diferencial) das imagens tendo em conta o relevo do terreno, em que a imagem oblíqua é projectada numa imagem isométrica em perspectiva ortogonal e com escala constante.

A Figura 1.5 representa as duas fases principais envolvidas no processo de desenvolvimento de um sistema de vídeo-monitorização, a calibração e a rectificação, e as respectivas notações para os sistemas de eixos adoptadas no decorrer deste trabalho.

No Capítulo 4 (Aplicação Prática) é efectuada uma descrição detalhada da aplicação do sistema de vídeo-monitorização desenvolvido a um sistema litoral, a Praia do Alfeite, de forma a testar a aplicabilidade do mesmo. Por fim no Capítulo 5 (Conclusões e Considerações finais) é apresentada uma súmula das principais conclusões obtidas no decorrer deste trabalho e tecem-se algumas recomendações sobre a utilização deste sistema.

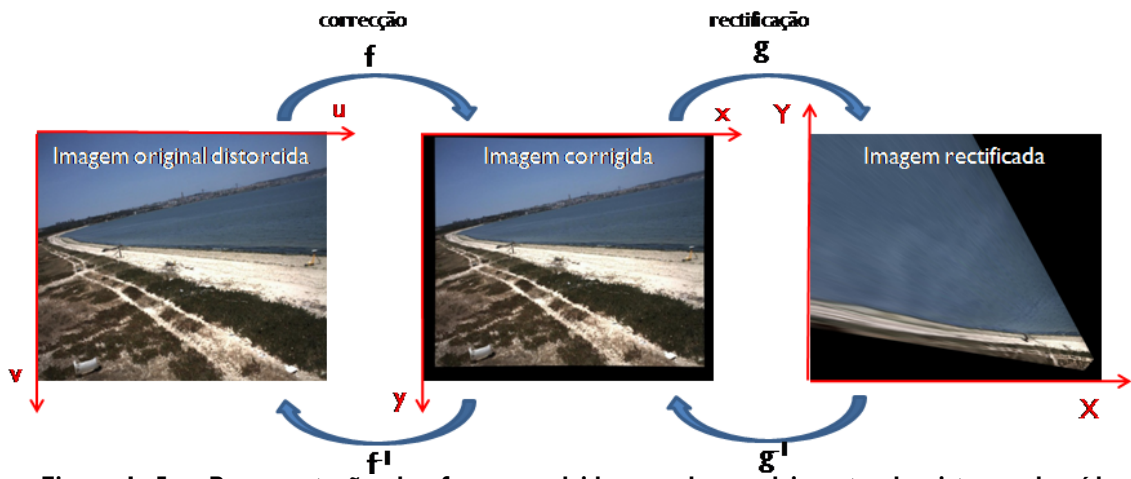


Figura I. 5 – Representação das fases envolvidas no desenvolvimento do sistema de vídeo-monitorização, f^{-1} é definida pelo modelo de distorção (determinado na fase de calibração da câmara) e g^{-1} pelas equações de colinearidade.

2 Calibração

2.1 Introdução

A calibração das câmaras constitui um primeiro passo essencial para a utilização de câmaras na quantificação e georreferenciação dos diversos processos opticamente identificáveis em imagem. A calibração é, deste modo, fundamental para o estabelecimento de uma relação precisa e fiável do mundo real (3D) a partir de imagens (2D), através da determinação rigorosa de diversas constantes próprias de cada câmara e que são responsáveis pelos desvios nas imagens relativamente às posições que deveriam ocupar se seguissem, sem erros, o modelo geométrico teórico. Estas constantes são geralmente designadas por **parâmetros intrínsecos** ou **elementos de orientação interna** e são geralmente determinadas em laboratório através de medições rigorosas de imagens alvo perfeitamente conhecidas, no processo designado por **calibração**.

Actualmente existe uma série de ferramentas informáticas de livre acesso direccionadas para a calibração das câmaras, de um modo geral estas ferramentas lêem imagens de um padrão cujas dimensões são perfeitamente conhecidas, adquiridas pela câmara a calibrar, segue-se a identificação dos pontos de referência na imagem e a determinação dos desvios entre as posições que ocupam e as que deveriam de ocupar seguissem o modelo teórico sem serem alvo de distorções. Desta forma, é definido o modelo de distorção da câmara, do qual fazem parte os parâmetros intrínsecos da câmara e são corrigidos os desvios geométricos induzidos pelas câmaras e criadas novas imagens corrigidas. No decorrer deste trabalho optou-se por utilizar *software* de livre acesso para a determinação dos parâmetros intrínsecos da câmara, por serem característicos e invariantes para cada câmara, e pelo desenvolvimento de *software* próprio para a correcção das imagens de modo a permitir a manipulação das imagens corrigidas e a sua integração em outros *softwares*, nomeadamente o *software* de rectificação desenvolvido no âmbito do presente trabalho.

2.1.1 Objectivos deste capítulo

Pretende-se, neste capítulo, encontrar o procedimento de calibração mais eficaz para a câmara de vídeo a utilizar na vídeo-monitorização, capaz de ser aplicado a diferentes tipos de câmaras, como câmaras fotográficas digitais. O objectivo fundamental da fase de calibração da câmara é a determinação dos parâmetros intrínsecos das câmaras de vídeo e a transformação das imagens adquiridas, inicialmente com distorções, em imagens correctas, sem desvios geométricos importantes. Pretende-se determinar os parâmetros intrínsecos da câmara através da utilização de *software* livre, e utilizá-los para corrigir as imagens em *software* próprio desenvolvido no âmbito deste trabalho.

Este Capítulo apresenta a problemática da calibração das câmaras bem como a metodologia adoptada, neste trabalho, para a determinação dos principais parâmetros intrínsecos da câmara de vídeo. Esclarece-se o significado dos diferentes parâmetros, bem como os fundamentos matemáticos nos quais se baseiam a sua determinação (2.2 Fundamentos teóricos). Neste capítulo são ainda descritos o procedimento laboratorial efectuado para a calibração da câmara de vídeo e a utilização do software livre “Toolbox de Calibração de Câmaras para o Matlab” (disponível em: Vision Caltech, 2007c) utilizado para a determinação dos parâmetros internos da câmara (2.3 Calibração laboratorial). A correcção das imagens, tendo por base o conhecimento dos parâmetros intrínsecos (determinados pelo *software* de Calibração de Câmaras para Matlab), será efectuada através de software desenvolvido no âmbito deste trabalho, e cuja descrição se encontra no ponto 2.4 Correcção de imagens, seguindo-se uma breve discussão sobre a metodologia de calibração adoptada durante o processo de calibração (2.5 Discussão).

2.2 Fundamentos teóricos

De modo a proceder-se a quantificações espaciais correctas a partir de imagem é fundamental efectuar a calibração das câmaras. A calibração compreende a determinação das características ópticas e geométricas internas da câmara, ou seja os **parâmetros intrínsecos**, necessários para estabelecer a correspondência entre um ponto no sensor (*CCD charge-coupled device*) da câmara e o seu correspondente na imagem (pixéis) e para minimizar os erros e corrigindo as distorções provocadas, essencialmente, pelas características das lentes, de onde se destacam as superfícies curvas e a espessura das mesmas, responsáveis pela maior parte dos desvios a uma geometria teórica perfeita.

A calibração das câmaras digitais de vídeo (bem como câmaras fotográficas, cujo funcionamento óptico é semelhante) compreende a determinação da distância focal efectiva, a localização do centro óptico da imagem ou ponto principal, a determinação do coeficiente de desfasamento e a determinação dos coeficientes de distorção da imagem, nos quais se incluem os coeficientes de distorção radial e tangencial. No caso das câmaras analógicas há que considerar outros parâmetros importantes para a calibração intrínseca das câmaras, como o caso das distâncias entre marcas fiduciais opostas e o ângulo de intersecção das marcas fiduciais, bem como os erros associados ao processamento de imagem com base em filmes.

A **distância focal (f)** corresponde à distância entre o ponto focal e o centro óptico da lente (i.e. entre o plano da imagem e o centro da projecção) (ver Figura 1.3), nem sempre corresponde à distância focal descrita nas especificações técnicas das câmaras. A **posição do centro óptico** da imagem (ou ponto principal) corresponde às coordenadas na imagem do ponto em que um raio de luz entra perpendicularmente à lente da câmara, este ponto é também geralmente designado por

centro de colimação (Berberan, 2003). O **coeficiente de desfasamento** designa o ângulo entre os eixos x e y da imagem, nas imagens digitais representa o cisalhamento do pixel. Por fim, a determinação dos **coeficientes de distorção** é essencial para a correcção dos desvios geométricos (ou aberrações geométricas) induzidos pelas lentes e que têm implicações graves na precisão métrica da imagem (Mikhail et al., 2001).

As distorções das imagens são induzidas pelas lentes e provocam uma degradação na qualidade geométrica das imagens e ocorre quando os raios de luz são dobrados ou mudam de direcção ao passarem na lente da câmara, os raios que passam pela lente deixam de ser paralelos à direcção que entraram (Wolf & Dewitt, 2000), na prática todas as lentes induzem distorções na imagem, uma vez que durante a passagem dos raios de luz pela lente, estes sofrem efeitos de refacção que alteram a direcção original dos raios. As distorções são geralmente classificadas em dois tipos, de acordo com as suas características geométricas: a distorção radial e a distorção tangencial, também designada por distorção descentrada.

A distorção radial corresponde ao deslocamento radial de um ponto na imagem relativamente à posição que teoricamente deveria ocupar, neste caso de distorção os pontos deslocados dispõem-se radialmente em torno do ponto central, ou seja o ponto da imagem onde um raio de luz entra perpendicularmente à lente da câmara, constituindo por isso o local com menor distorção da imagem. A Figura II.1 representa o efeito, exagerado, da distorção radial sobre um padrão inicialmente constituído por pontos paralelos entre si. Este tipo de distorção pode ser positiva, quanto o efeito radial é em direcção ao ponto central, ou negativa quando há divergência radial relativamente ao ponto central (como p. ex. a Figura II.1).

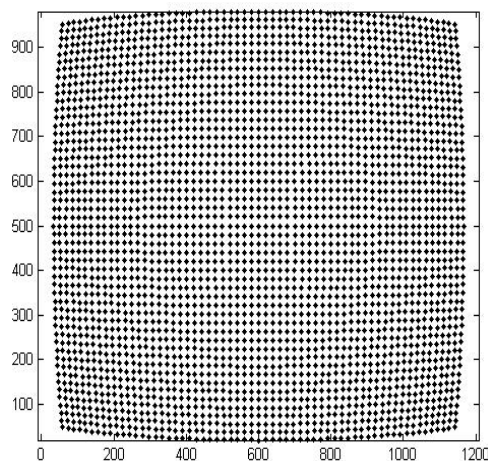


Figura II. 1- Exemplo do efeito da distorção radial (negativa), num padrão inicialmente homogéneo.

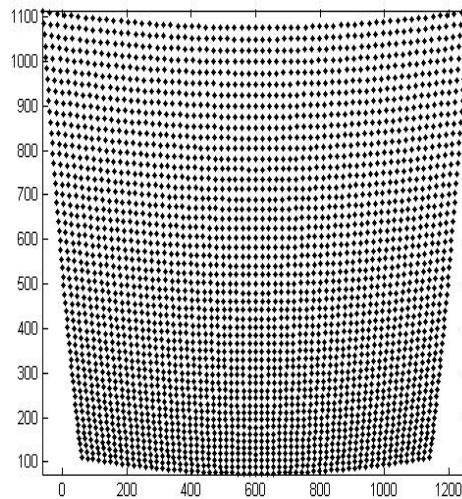


Figura II. 2- Exemplo do efeito da distorção tangencial, num padrão inicialmente homogéneo

A distorção tangencial, também designada por distorção descentrada, por sua vez, é causada por erros na instalação das lentes e restantes componente ópticos provocando desalinhamentos dos eixos ópticos da câmara. Este tipo de distorção apresenta duas componentes, uma componente radial na medida em que a distorção é dependente da distância radial ao ponto central, e uma componente tangencial em função do deslocamento segundo os eixos x e/ou y (Figura II.2).

Os coeficientes de distorção podem ser modelados por equações matemáticas cujos coeficientes são obtidos através da calibração das câmaras (Brito & Coelho, 2002), geralmente em laboratório através da aquisição de imagens alvo com padrões perfeitamente conhecidos, sobre as quais se determinam os desvios da imagem relativamente à sua posição no modelo teórico, i.e. a posição que ocuparia se câmara produzisse uma perspectiva perfeitamente geométrica (Wolf & Dewitt, 2000). As equações matemáticas que modelam a distorção têm por base, na grande maioria dos casos, o ajuste polinomial a diferentes graus, em que são determinados os coeficientes polinomiais respectivos à distorção radial e os coeficientes relativos à distorção descentrada (ou tangencial).

A calibração das câmaras, pode ser efectuada através de uma vasta gama de metodologias, baseada em processos de linearização das equações da colinearidade ou por métodos não lineares. As equações da colinearidade não são lineares, mas podem ser linearizadas, geralmente para a calibração de câmaras, através do teorema de Taylor (Wolf & Dewitt, 2000) ou através do método directo de linearização DLT (*Direct Linear Transformation*) desenvolvido por Abdel-Aziz & Karara em 1971 (*in*: Heikkila & Silvén, 1997 e Clarke & Wang, 1998). Apesar das soluções lineares serem mais simples de adoptar, normalmente não são capazes de modelar as distorções das lentes (Basu, 1995) e a usual simplificação dos procedimentos de cálculo reduzem a precisão dos resultados, enquanto, por outro lado, as soluções não lineares são computacionalmente mais complexas, e geralmente processam-se de modo iterativo, exigindo uma boa aproximação inicial dos parâmetros

de entrada para que haja convergência nos resultados. No entanto, com os actuais desenvolvimentos computacionais as estimativas não lineares deixaram de ser tão restritas como alguns anos atrás (Heikkila, 2000).

Recentes técnicas utilizam os processos lineares juntamente com processos não lineares para a calibração das câmaras, de um modo geral, determinam os parâmetros da câmara através da linearização das equações de colinearidade, tendo por base o modelo geométrico livre de distorções, e numa segunda fase, utilizam os parâmetros determinados como aproximação inicial no processo iterativo (não linear) de ajuste com base nos mínimos quadrados, isto é minimizando o quadrado dos desvios entre os pontos observados e a sua projecção teórica (p.ex. Wang et al., 1992; Heikkila, 2000; Heikkila & Silvén, 1997).

Neste trabalho adoptou-se pela calibração dos parâmetros intrínsecos da câmara utilizando o *software* de livre acesso, *Camera Calibration Toolbox for Matlab*, desenvolvido pelo *Computer Vision Research Group* do Departamento de Engenharia Eléctrica do Instituto tecnológico da Califórnia, e que têm por base o modelo proposto por Heikkila & Silvén (1997). Este *software* efectua a calibração das câmaras em quatro passos distintos:

1. O primeiro consiste na determinação analítica, utilizando o modelo DLT (*Direct Linear Transformation*), dos parâmetros que influenciam a condição de colinearidade (intrínsecos e extrínsecos) utilizando pontos de calibração (ou pontos de controlo) em que se conhecem as suas posições na imagem com distorção u_i e v_i e no terreno X_i , Y_i e Z_i para estabelecer a relação geométrica teórica entre a imagem e o terreno sem considerar as distorções radiais e tangenciais (Heikkila & Silvén, 1997). Deste passo resulta uma estimativa inicial dos parâmetros intrínsecos - o ponto principal, o coeficiente de desfasamento entre os eixos da imagem, os factores de escala da imagem; e dos extrínsecos - matriz de rotação e vector de translação (Coelho & Tavares, 2003).
2. O segundo passo, corresponde à estimação não linear dos parâmetros pelo método dos mínimos quadrados, minimizando os resíduos entre os resultados do modelo e as observações. Devido à natureza não linear do modelo da câmara a estimação dos parâmetros envolve a utilização de um processo iterativo, apoiado numa estimativa inicial dos parâmetros, que deverá ser o mais aproximada possível para que a convergência seja correcta e não fique “presa” num mínimo local. Neste sentido utilizam-se os parâmetros iniciais obtidos pelo método DLT, convergindo deste modo para uma solução rapidamente (Heikkila & Silvén, 1997). Desta aproximação não linear determinam-se os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmara, bem como, a distorção radial e tangencial.
3. O terceiro passo do método de calibração de Heikkila & Silvén (1997), envolve a correcção da distorção causada pela projecção perspectiva do padrão de calibração.
4. E o quarto passo, procede à correcção das coordenadas imagem distorcidas (u , v) em coordenadas imagem sem distorção (x , y) utilizando um modelo inverso empírico

(função f na Figura 1.5) que compensa as distorções radiais e tangenciais (Heikkila & Silvén, 1997; Coelho & Tavares, 2003).

2.3 Calibração laboratorial

A aquisição das imagens de calibração efectuou-se em laboratório, através da aquisição pela câmara de várias imagens, de diferentes ângulos, de um padrão com quadrados pretos e brancos fornecido juntamente com o *software* de calibração (Figura II.3). O padrão foi impresso em grande formato e foram efectuadas medidas rigorosas das dimensões dos quadrados ao longo de todo o padrão. A aquisição das imagens efectuou-se através de fixação do padrão numa parede e pela modificação da posição da câmara, permitindo a aquisição das imagens em diferentes ângulos (Figuras 4 e 5).

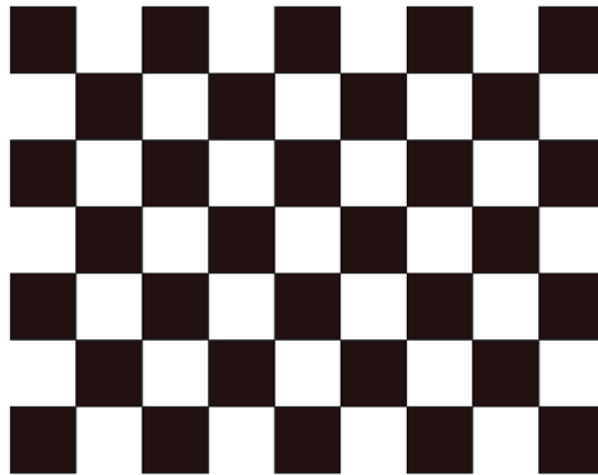


Figura II. 3 – Padrão de calibração da câmara, fornecido com o software de calibração “Camera Calibration Toolbox for Matlab”.

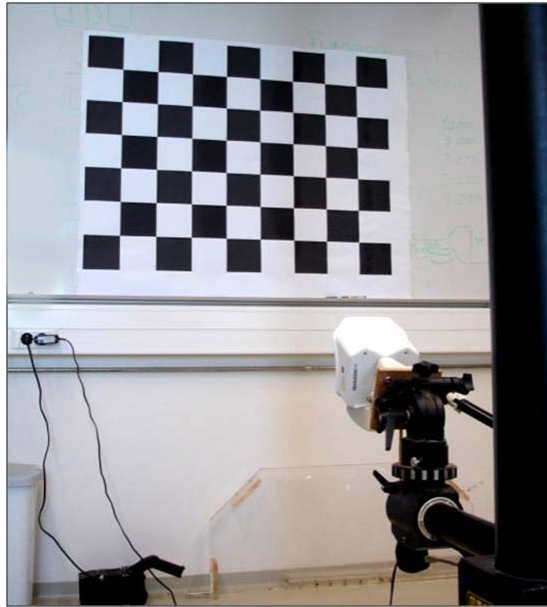


Figura II. 4 – Aspecto da instalação da câmara de vídeo para a aquisição de imagens do padrão de calibração.

A Figura II.6, mostra o efeito da distorção radial (a mais perceptível) da câmara, em que se percebe um encurvamento das rectas, especialmente nos extremos da imagem, existindo uma divergência radial da imagem relativamente ao ponto central.

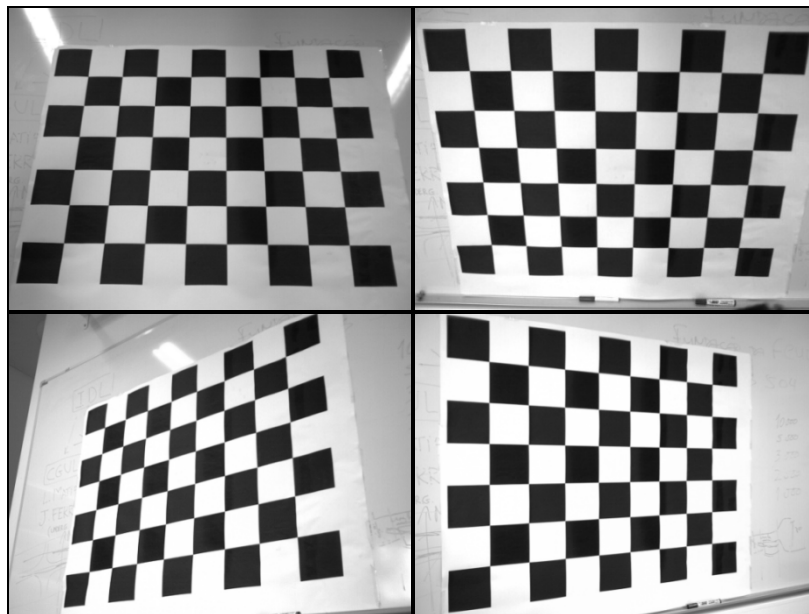


Figura II. 5 – Exemplos de diferentes perspectivas de aquisição de imagem.

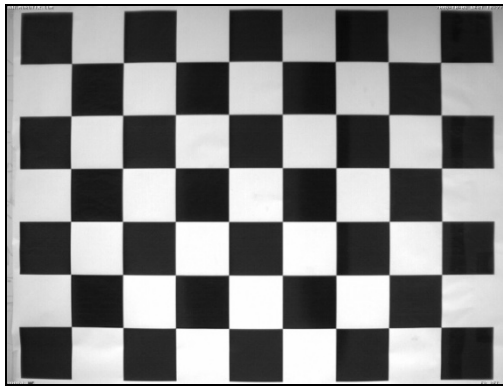


Figura II. 6 – Imagem adquirida pela câmara de vídeo, onde é claramente perceptível a distorção radial.

Segue-se uma descrição sumaria dos procedimentos a ter durante a calibração da câmara com a *Toolbox* de Calibração de Câmaras para Matlab (uma descrição mais detalhada poderá ser encontrada em Coelho & Tavares, 2003 e em exemplos de calibração disponíveis em Vision Caltech (2007). Em ambiente Matlab, corre-se a *toolbox* de calibração (Figura II.7), onde numa primeira fase são lidas as imagens para a calibração (Figura II.8).



Figura II. 7 – Menu principal da *Toolbox* de Calibração de Câmaras para Matlab.

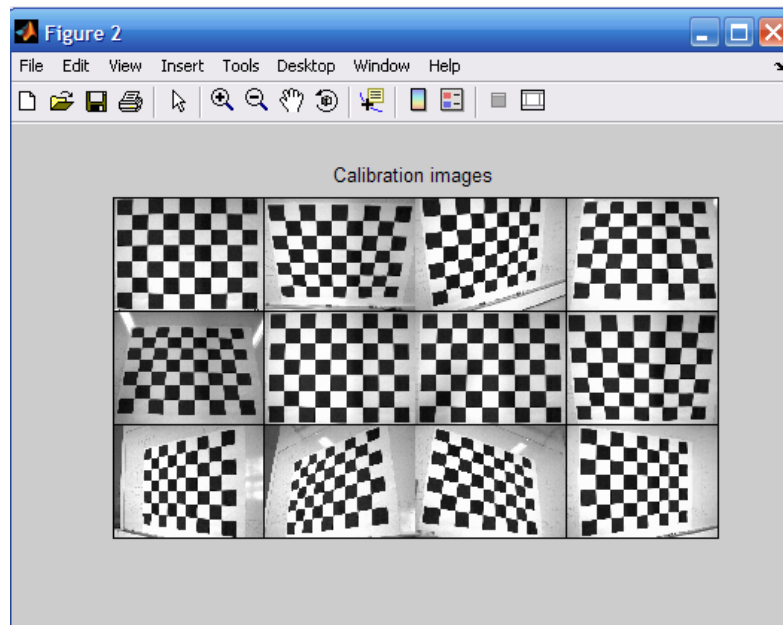


Figura II. 8 – Imagens de diferentes ângulos para calibração da câmara.

Segue-se a localização dos cantos da grelha de calibração, clicando sobre os quatro cantos seguindo uma ordem circular, como exemplificado na Figura II.9 à esquerda, e introduzindo como

parâmetro de entrada as dimensões reais segundo x e y dos quadrados. A extracção dos restantes vértices do padrão é efectuada pelo *software* de modo automático, resultando deste processo uma imagem cujos conjuntos de vértices foram estimados pela *toolbox* (Figura II.9, à direita).

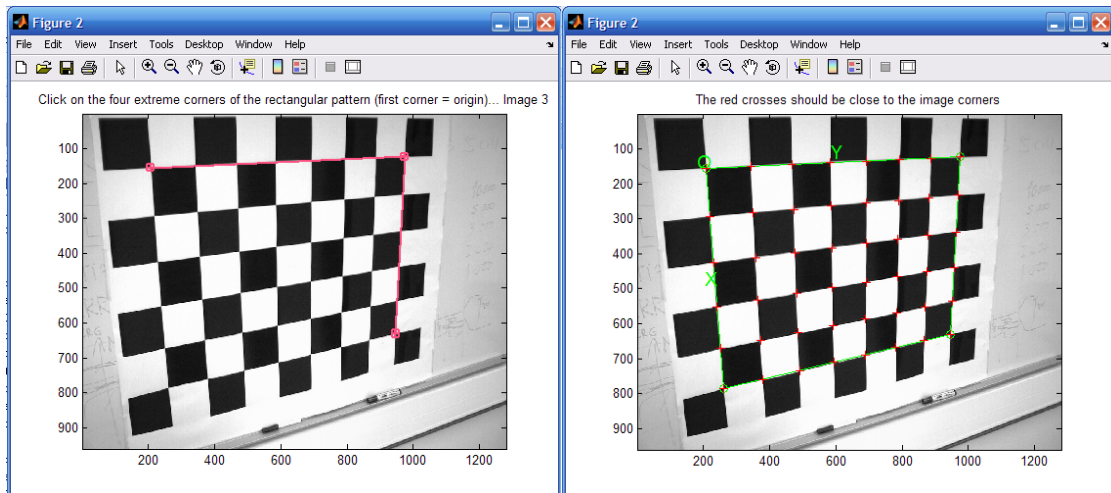


Figura II. 9 – Extracção dos vértices do padrão (a esquerda representa a localização dos cantos da grelha necessários à extracção dos restantes vértices do padrão automaticamente, imagem direita).

Após a extracção dos vértices de todas as imagens, neste caso foram utilizadas 12 imagens de diferentes ângulos, efectuou-se a calibração da câmara, da qual resultam os parâmetros intrínsecos estimados pela aproximação inicial baseada na linearização das equações (como: *calibration parameters after initialization*) e os parâmetros intrínsecos estimados pelo modelo não linear (método dos mínimos quadrados) e respectivos desvios padrão (como: *calibration parameters after optimization*), como se pode observar na Figura seguinte (Figura II.1):

```

MATLAB 7.4.0 (R2007a)
File Edit Debug Desktop Window Help
Current Directory: C:\Documents and Settings\Ana\Desktop\hello

Calibration parameters after initialization:

Focal Length:      fc = [ 1539.50914  1539.50914 ]
Principal point:   cc = [ 639.50000  479.50000 ]
Skew:              alpha_c = [ 0.00000 ] => angle of pixel = 90.00000 degrees
Distortion:        kc = [ 0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000 ]

Main calibration optimization procedure - Number of images: 12
Gradient descent iterations: 1...2...3...4...5...6...7...8...9...10...done
Estimation of uncertainties...done

Calibration results after optimization (with uncertainties):

Focal Length:      fc = [ 1533.76044  1536.93490 ] ± [ 3.05483  3.05827 ]
Principal point:   cc = [ 637.92441  502.32740 ] ± [ 3.67331  2.93822 ]
Skew:              alpha_c = [ 0.00000 ] ± [ 0.00000 ] => angle of pixel axes = 90.00000 ± 0.00000 degrees
Distortion:        kc = [ -0.15698  0.25748  0.00069  -0.00032  0.00000 ] ± [ 0.01068  0.06490  0.00048  0.00059  0.00000 ]
Pixel error:       err = [ 0.27476  0.21463 ]

Note: The numerical errors are approximately three times the standard deviations (for reference).

```

Figura II. 10- Resultados da calibração da câmara através da Toolbox de Calibração para Matlab.

A câmara de vídeo utilizada é caracterizada por uma distância focal (*fc*) de cerca de 1533.76 e 1536.93 (± 3) píxeis, segundo as direcções x e y, respectivamente, com o ponto principal (*cc*)

localizado, aproximadamente, na posição 637.92, 502.32 da imagem. O vector α_c representa o coeficiente de desfasamento, que neste caso foi considerado o valor definido por omissão (0), ou seja os eixos x e y formam um ângulo de 90° entre si.

O vector kc (com 5 parâmetros) contém os coeficientes, de sexta ordem, correspondentes à distorção radial (kc(1), Kc(2) e kc(5)) e tangencial (kc(3) e kc(4)), (ver Equações II.2 e II.3, capítulo 2.4). Os coeficientes de distorção obtidos foram:

$$kc = [-0.15698 \quad 0.25748 \quad 0.00069 \quad -0.00032 \quad 0.00000] \pm [0.01068 \quad 0.06490 \quad 0.00048 \quad 0.00059 \quad 0.00000]$$

Os resultados do modelo de distorção radial e tangencial obtidos pela *Toolbox* de Calibração de Câmaras, pode ser visualizado em separado na Figura II.11, enquanto o modelo global de distorção obtido durante a calibração se encontra representado na Figura II.12, as setas azuis representam o deslocamento do pixel induzido pela lente.

Finalmente, o erro associado à calibração dos parâmetros intrínsecos desta câmara é cerca de 0.27 e 0.21 pixels segundo, respectivamente, a direcção x e y da imagem.

Os resultados dos parâmetros intrínsecos da câmara são gravados num ficheiro designado por "calib_dat.mat" onde ficam gravadas as diferentes variáveis obtidas durante este processo de calibração.

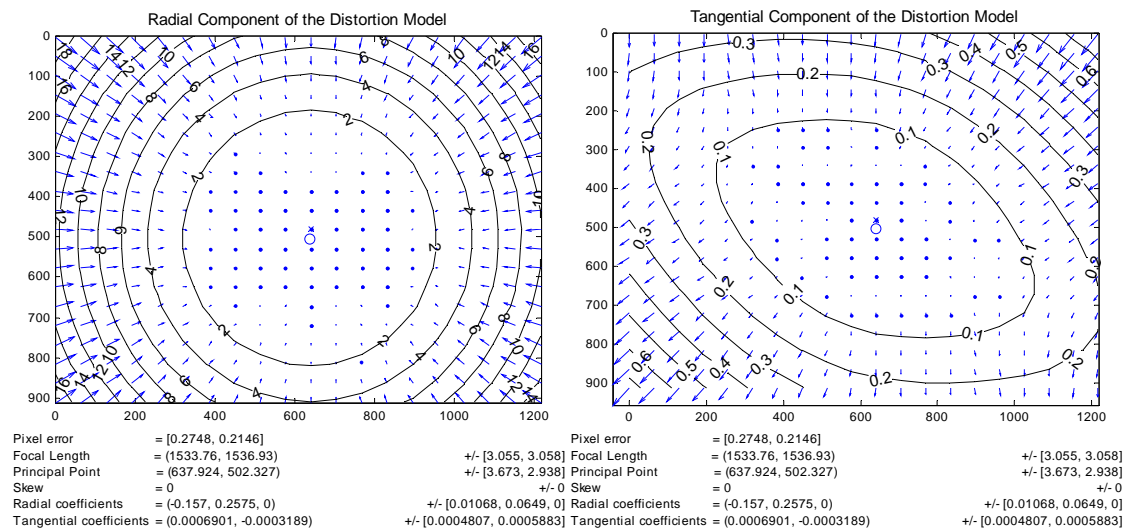


Figura II. 11 – Componente radial (esquerda) e tangencial (direita) do modelo de distorção.

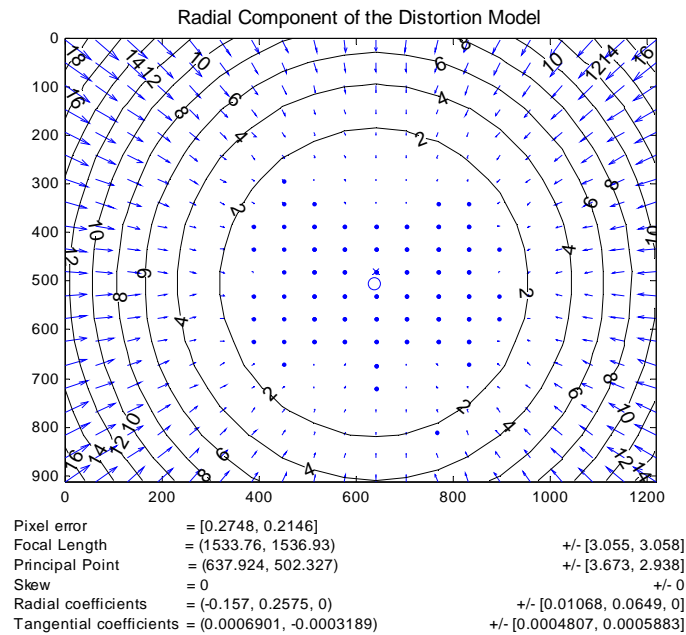


Figura II. 12- Modelo de distorção completo, incluído a distorção radial e tangencial.

O *software* de calibração permite ainda a análise do erro associado a cada uma das imagens bem como uma análise do erro associado à totalidade das imagens utilizadas, através da imagem “*reprojection error*” (Figura II.13), que possibilita verificar se a dispersão do erro é homogénea em todas as imagens ou se, por outro lado, existem imagens com erro particularmente mais elevado do que outras. Caso existam imagens com um erro bastante elevado, é possível repetir o processo de calibração extraíndo a imagem em questão. No caso da calibração efectuada não foi eliminada nenhuma imagem durante o processo de calibração uma vez que a dispersão de erro é relativamente homogénea para todas as imagens (Figura II.13 direita), não existindo nenhuma imagem que se destacasse por ter erros significativos relativamente às restantes.

A distribuição espacial das diferentes imagens de calibração, relativamente à posição da câmara, isto é os parâmetros de orientação externa da câmara (parâmetros extrínsecos) pode ser visualizada em 3 dimensões através da ferramenta “*show extrinsic*” que mostra várias posições do plano de calibração (imagens) relativamente à câmara fixa (Figura II.14, esquerda), ou por outro lado as várias posições da câmara em relação a uma imagem imóvel (Figura II.14, direita).

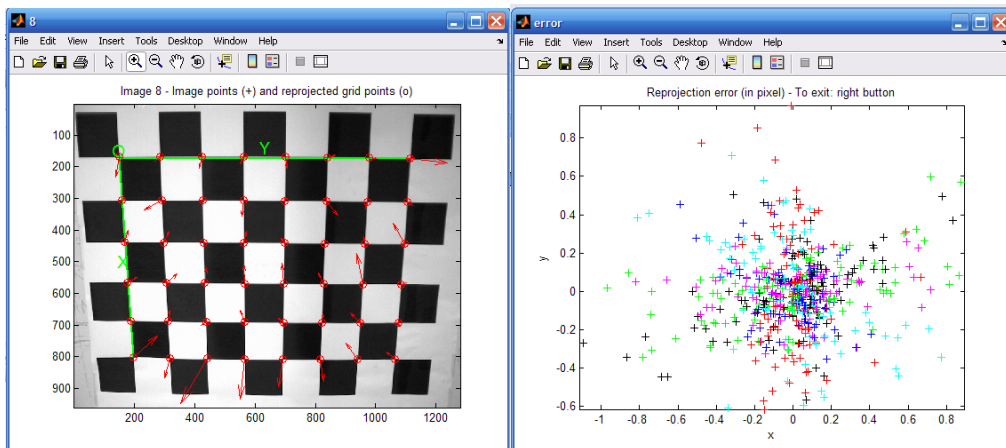


Figura II. 13- Análise espacial do erro ao longo de uma imagem de calibração (à esquerda) e a re-projecção do erro de todas as imagens (direita).

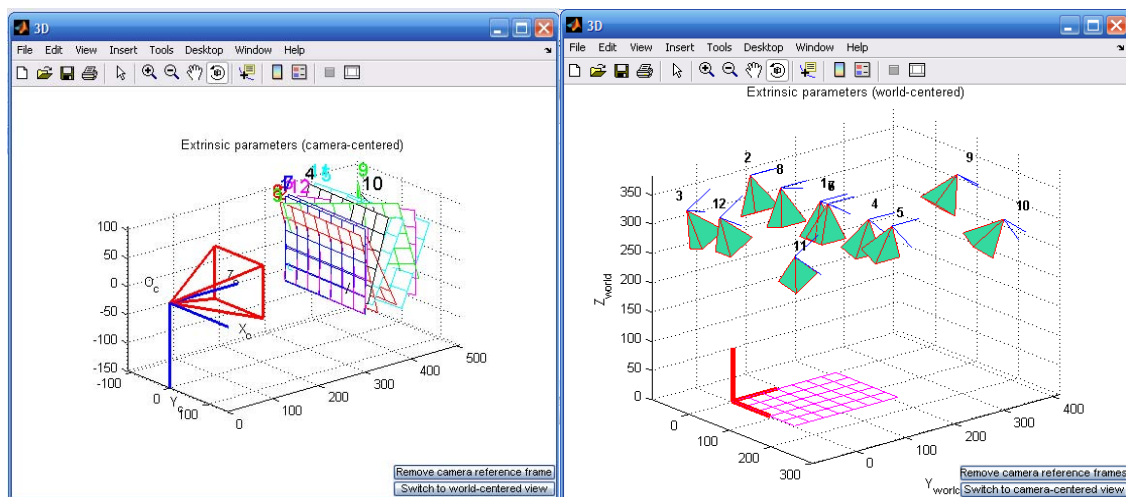


Figura II. 14 – Distribuição espacial das imagens de calibração relativamente à posição da câmara (imagem da esquerda) e posições da câmara relativamente a uma imagem fixa (imagem da direita).

2.4 Correção de imagens

A correcção das imagens consiste na eliminação dos efeitos induzidos pelos parâmetros intrínsecos da câmara de modo a resultar uma imagem corrigida, na qual se podem efectuar a relação geométrica correcta entre o sistema imagem e terreno. Após a determinação dos parâmetros intrínsecos da câmara na calibração laboratorial, nomeadamente a distância focal, o ponto principal, o coeficiente de desfasamento e os coeficientes de distorção das imagens, procede-se correcção da imagem.

A correcção da imagem implica o conhecimento do modelo interno da câmara, i.e. o modelo que transforma uma imagem sem desvios geométricos numa imagem com distorção, de modo a corrigir todos os pixels de uma imagem através do modelo inverso empírico para compensar as distorções da lente.

No presente trabalho a correcção das imagens teve como base o modelo interno da câmara descrito em Vision Caltech (2007b), que corresponde ao utilizado na *Toolbox* de Calibração de Câmaras (proposto por Heikkila & Silvén, 1997) com algumas diferenças de terminologia de parâmetros. Assim, o modelo interno da câmara pode ser descrito matricialmente da seguinte forma, onde KK corresponde à matriz da câmara e inclui alguns parâmetros determinados na calibração (ver capítulo 2.3):

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = KK \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{onde} \quad KK = \begin{bmatrix} fc(1) & alpha_c * fc(1) & cc(1) \\ 0 & fc(2) & cc(2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Equação II. 1}$$

onde x_p e y_p representam a coordenadas dos pontos, no sistema de coordenadas imagem distorcida. O vector, com 2 elementos, x_d corresponde ao ponto com as componentes distorção radial e tangencial e é definido numericamente como:

$$x_d = \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \end{bmatrix} = (1 + kc(1)r^2 + kc(2)r^4 + kc(5)r^6)x_n + dx \quad \text{Equação II. 2}$$

em que r é a distância radial, ao centro da imagem, do ponto definido pelo vector $x_n = [x; y]$, que por sua vez contém as coordenadas não distorcidas dos pontos, finalmente dx corresponde ao vector da componente tangencial da distorção:

$$dx = \begin{bmatrix} 2kc(3)xy + kc(4)(r^2 + 2x^2) \\ kc(3)(r^2 + 2y^2) + 2kc(4)xy \end{bmatrix} \quad \text{Equação II. 3}$$

Como se pode verificar, a componente tangencial da distorção é essencialmente caracterizada pelos elementos $kc(3)$ e $kc(4)$ do vector de distorção kc (equação II.3), e a componente radial é caracterizada pelos elementos $kc(1)$, $kc(2)$ e $Kc(5)$ (equação II.2) sendo este ultimo um coeficiente de sexta ordem (ver quinta entrada do vector x_d equação II.2).

A determinação das coordenadas não distorcidas de toda a imagem (x_n) a partir das coordenadas da imagem distorcida (x_p, y_p) designa-se por mapeamento inverso (“*back-projection*” Heikkila & Silvén, 1997) e não corresponde a uma relação directa, sendo que não existe nenhuma solução analítica para esta transformação devido essencialmente às elevadas ordens que os coeficientes constituem no modelo de distorção da câmara. Para resolver a problemática do mapeamento inverso Heikkila & Silvén (1997) utilizam uma expressão aproximação que compensa as distorções, pelo processo designado por modelo inverso empírico (Coelho & Tavares, 2003), enquanto outros autores utilizam, por exemplo, uma aproximação iterativa ou o ajuste a polinómios do terceiro grau para as distorções das lentes.

Neste trabalho utilizou-se o mapeamento inverso através da criação de uma estrutura multidimensional espacial de transformação em Matlab (*TFORM structure*), baseada numa função que permite o mapeamento directo bem como o mapeamento inverso de funções não lineares. Deste modo, através da criação de uma estrutura que tem por base a função de transformação de imagem não distorcida para imagem distorcida (função que define o modelo de distorção da câmara), é possível pelo mapeamento inverso (*inverse mapping*) do Matlab, eliminar os desvios geométricos induzidos pela câmara criando uma imagem livre de distorções a partir da imagem distorcida (Figura I.5, função *f*) (Matlab Central, 2007).

O mapeamento inverso baseia-se na criação de uma imagem "vazia" livre de distorções, com uma dimensão previamente definida, e na localização de cada um dos pixels de uma imagem sem distorção (*output space* em coordenadas *x, y*) aplicar a função que distorce o pixel (modelo de distorção) e determinar a sua posição correspondente na imagem distorcida (*input space* em coordenadas *u, v*). Seguidamente, extrai por interpolação espacial a informação do pixel da imagem distorcida, para caracterizar o pixel correspondente na imagem, sem distorções, originalmente "vazia" (Figura II.15).

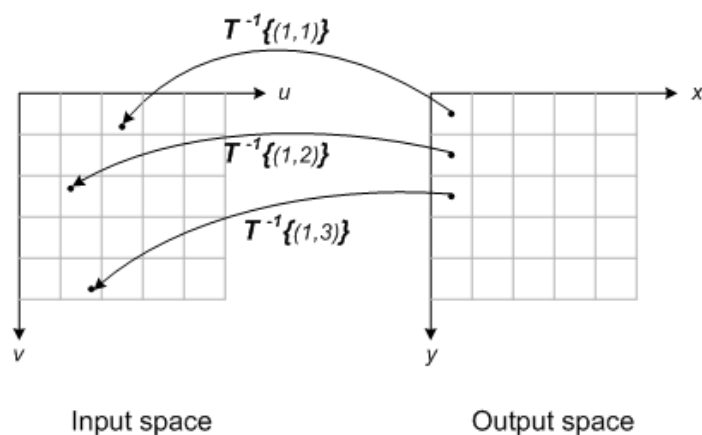


Figura II. 15 – Diagrama que ilustra o procedimento utilizado no mapeamento inverso. O *input space* representa a imagem distorcida (*u, v*), o *output space* a imagem sem distorção (*x, y*) e T^{-1} é a função definida pelo modelo de distorção (equivalente a f^{-1} na Figura I.5) (retirado de: Matlab Central, 2007).

Partindo dos presentes conhecimentos foi criado um programa em Matlab para a correcção das imagens, foram programadas as funções de distorção definidas no presente capítulo e aplicado o método do mapeamento inverso (*inverse mapping*). Na estrutura de transformação (*TFORM*) foi definido o método de transformação espacial "custom" que se baseia na função de distorção e nos seus parâmetros. No processo de transformação espacial, foi utilizado o método de interpolação espacial "nearest", uma vez que se revelou o método mais conservativo da clareza da imagem.

O programa criado é assim capaz de corrigir os efeitos da lente da câmara de uma imagem distorcida a partir da leitura do ficheiro "calib_dat.mat", que contém os parâmetros intrínsecos, e criar uma imagem corrigida, que teoricamente passa a estabelecer uma relação puramente geométrica com o terreno (Figura II.16).

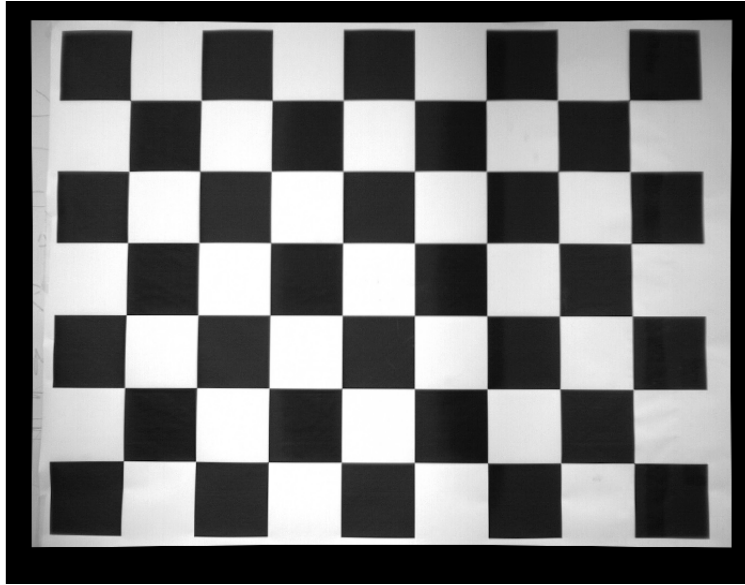


Figura II. 16 – Imagem do padrão de calibração corrigida.

2.5 Discussão

A calibração da geometria da câmara é um processo fundamental no correcto mapeamento do terreno em imagens bidimensionais, e conseqüentemente para a obtenção de informação métrica a partir de imagens. As câmaras aéreas fotogramétricas, também designadas por câmaras métricas, são geralmente construídas de modo a minimizar os erros induzidos pelas lentes, nomeadamente a grande qualidade do sistema de lentes, a estabilidade dimensional do sistema óptico-imagem, a abertura e a rapidez de disparo, entre outras características das lentes, que são definidas de modo a aumentarem a eficiência na aquisição de imagem bem como distribuir a luz uniformemente (Berberan, 2003) sendo que os custos associados a este equipamento são bastante elevados.

Os desenvolvimentos das técnicas fotogramétricas, aliado aos desenvolvimentos tecnológicos computacionais permitiram a modelação matemática da geometria das câmaras e conseqüentemente a propagação no uso de câmaras não métricas em fotogrametria de curto alcance (Mikhail et al., 2001 e Chandler et al., 2005). A utilização de técnicas de calibração em laboratório (*self-calibration techniques*) de câmaras comuns aumenta significativamente a sua precisão, de tal modo que Chandler et al. (2005) efectuaram testes comparativos entre câmaras comuns e a uma câmara métrica, nos quais obtiveram maiores precisões com uma das câmaras não métricas calibrada do que com a câmara métrica, demonstrando deste modo que as câmaras mais baratas têm um enorme potencial em medições de superfícies quando considerado o modelo da lente, i.e. efectuada a correcta calibração dos parâmetros intrínsecos da câmara. Estes parâmetros são invariantes e característicos de cada câmara, e como tal, apenas são necessários determinar uma vez (Holland et al., 1997).

No presente trabalho efectuou-se a calibração dos parâmetros intrínsecos da câmara, considerando não só a componente radial da distorção como também a componente tangencial,

utilizando o modelo utilizado pelo *software Toolbox* de Calibração de Câmaras para Matlab, similar ao proposto por Heikkila & Silvén (1997). Segundo Heikkila (2000) precisões na ordem de 1/50 da dimensão do pixel são alcançadas através deste método, se as fontes de erro relacionadas com a impressão do padrão ou outras aberrações cromáticas forem eliminadas, como por exemplo modificações na iluminação da imagem que têm um efeito importante nos resultados da calibração.

O erro obtido durante a calibração, associado à calibração dos parâmetros intrínsecos, foi de 0.2465 pixéis (0.27 e 0.21 pixéis segundo, respectivamente, a direcção x e y), cerca de 1/4 da dimensão do pixel. O resultado obtido, mais elevado do que o obtido por Heikkila (2000) em condições óptimas, poderá dever-se às condições de luminosidade durante a aquisição de imagens do padrão que não foram homogéneas (Figura II.5), bem como possíveis distorções do padrão adquiridas durante o processo de impressão. Contudo, o resultado obtido é um bom resultado estando abaixo da dimensão do pixel.

As componentes de distorção radial e tangencial da câmara constituem parâmetros importantes na calibração, sendo a componente radial bastante mais importante relativamente à componente tangencial (Figura II.11), por exemplo os extremos da imagem apresentam um deslocamento máximo de cerca de 18 pixéis devidos unicamente a distorção radial, enquanto a distorção tangencial induz um deslocamento máximo de cerca de 0.7 pixéis, que não deve no entanto ser negligenciado. O modelo final de distorção obtido para esta câmara é semelhante à componente radial da distorção, com desvios máximos de cerca de 18 pixéis nos extremos e que diminuem radialmente para o ponto principal da imagem (Figura II.12).

Para verificar a importância da correcção das distorções da câmara, foi ainda simulada uma calibração sem considerar a distorções da câmara (Figura II.17), sendo que os resultados apresentam erros bastante mais elevados, sob a forma de desvios padrão, bem como de erro total da calibração intrínseca de 0.9523 pixéis (cerca de 1.01 e 0.89 pixéis segundo a direcção x e y, respectivamente), comprovando a necessidade da fase de calibração dos parâmetros intrínsecos das câmaras para a sua utilização como ferramenta de aquisição de dados de natureza quantitativa.

A utilização da ferramenta *inverse mapping* de Matlab revelou ser uma ferramenta bastante útil na correcção dos efeitos de distorção da lente permitindo a criação de imagens sem distorção rapidamente do ponto de vista computacional, conferindo numa enorme vantagem essencialmente quando estamos perante uma grande quantidade de imagens em que o tempo de processamento constituiu uma questão fundamental neste processo.

Calibration results after optimization (with uncertainties):

```

Focal Length:      fc = [ 1536.15026  1536.15026 ] ± [ 11.58545  11.58545 ]
Principal point:   cc = [ 633.76441  490.40316 ] ± [ 5.59536  6.40216 ]
Skew:             alpha_c = [ 0.00000 ] ± [ 0.00000 ] => angle of pixel axes = 90.00000 ± 0.00000 degrees
Distortion:       kc = [ -0.00000  0.00000  0.00000  -0.00000  0.00000 ] ± [ 0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000 ]
Pixel error:      err = [ 1.01224  0.88838 ]
  
```

Note: The numerical errors are approximately three times the standard deviations (for reference).

Figura II. 17 – Resultados da calibração da câmara, não considerando as distorções induzidas pela câmara.

Os resultados relativos ao modelo de distorção completo obtidos para câmaras fotográficas comuns, Kodac dx6490 e Sony p100 (Figuras II.18 e II.19), mostram resultados muito semelhantes aos da câmara de vídeo com parâmetros de distorção radial e tangencial na mesma ordem de grandeza. As maiores diferenças estão patentes nas margens das imagens onde o deslocamento dos pixels induzido pela lente é mais evidente, devido essencialmente à dimensão das imagens que é bastante superior (2304 x 1536 e 2592 x 1944, respectivamente para a câmara Kodac e Sony) à dimensão das imagens da câmara de vídeo.

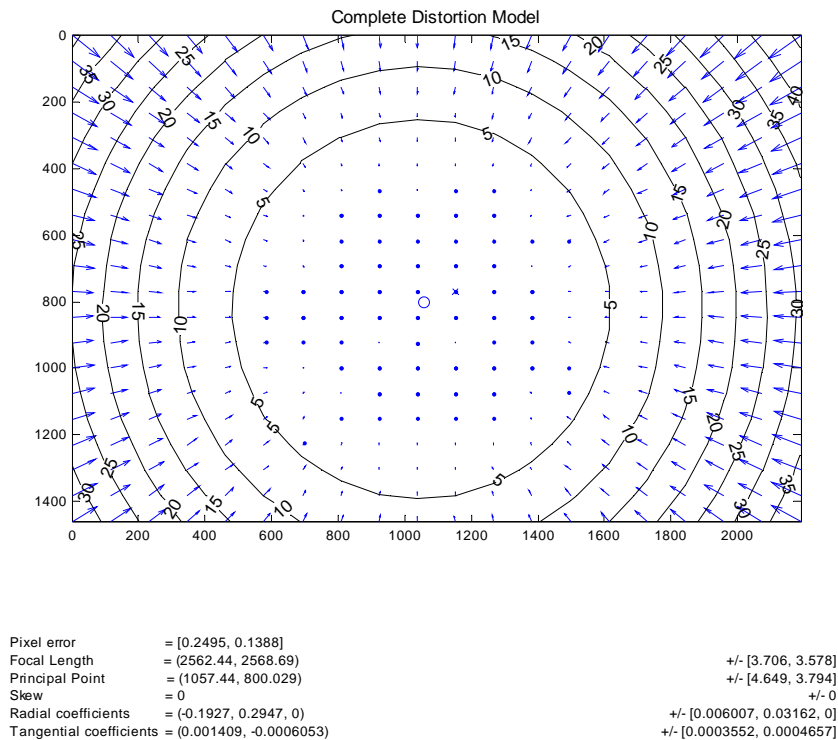
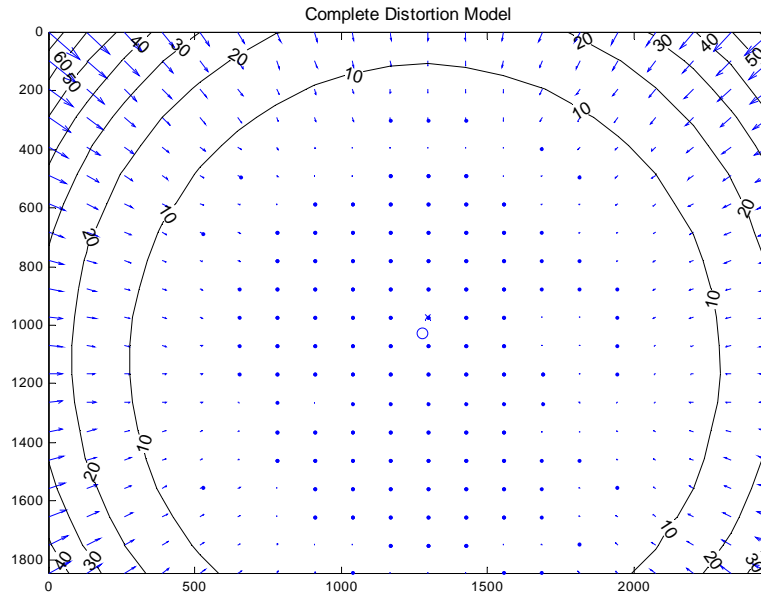


Figura II. 18 – Modelo de distorção completo para a câmara fotográfica Kodac dx6490.



Pixel error	= [0.3316, 0.2193]	
Focal Length	= (2875.61, 2882.88)	+/- [2.99, 2.767]
Principal Point	= (1276.73, 1026.54)	+/- [4.76, 4.01]
Skew	= 0	+/- 0
Radial coefficients	= (-0.04824, -0.2588, 0)	+/- [0.008572, 0.06089, 0]
Tangential coefficients	= (0.003434, 0.0003419)	+/- [0.000414, 0.0004716]

Figura II. 19 – Modelo de distorção completo para a câmara fotográfica Sony p100.

O conhecimento do modelo de distorção das câmaras constitui, desta forma, um passo fundamental para a correcção das distorções induzidas pelas lentes e desta forma criar imagens corrigidas independentemente do sistema de aquisição que lhes deu origem.

A utilização de câmaras de características métricas pode ser suprida através de uma correcta calibração laboratorial do modelo de distorção de cada câmara.

3 Rectificação

3.1 Introdução

O processo de rectificação é o processo que transforma imagens oblíquas em imagens equivalentes verticais, ou imagens rectificadas, que são, teoricamente, livres de distorções devidas à obliquidade da câmara (Wolf & Dewitt, 2000). A rectificação de uma imagem oblíqua, previamente corrigida (Capítulo 2), passa pelo restabelecimento da geometria da orientação da câmara que lhe deu origem, i.e. pelo conhecimento dos **parâmetros extrínsecos** ou **parâmetros de orientação externa** da câmara no momento em que a imagem foi adquirida.

As imagens rectificadas, são teoricamente livres de erro, no entanto estas imagens apresentam desvios e variações na sua escala, devidos essencialmente ao relevo. A correcção dos efeitos do relevo pode ser efectuada no processo designado por **rectificação diferencial** ou **ortorrectificação**, na qual é adicionada a informação altimétrica ao processo de rectificação, p. ex., através da introdução de um modelo digital de terreno para corrigir o efeito perspectivo do relevo e deste modo passe a ser uma imagem com perspectiva ortogonal e como tal com escala uniforme (isométrica) sobre toda a superfície.

A determinação dos parâmetros extrínsecos da câmara efectua-se, geralmente, através do estabelecimento das relações geométricas entre as coordenadas dos pontos de controlo GCP (*Ground Control Points*) no terreno e as coordenadas dos respectivos pontos projectados no sistema de coordenadas imagem. Após o reconhecimento dos parâmetros extrínsecos para cada imagem, é possível rectificar a imagem, ou a partir do conhecimento das características altimétricas, ortorrectificá-la.

3.1.1 Objectivos deste capítulo

O presente capítulo, como o nome indica, aborda a problemática da rectificação das imagens oblíquas bem como a rectificação diferencial ou ortorrectificação. Pretende-se nesta tarefa, em *software* desenvolvido para esse efeito, efectuar a determinação dos parâmetros extrínsecos da câmara, que definem a sua localização e orientação espacial no momento em que a imagem foi adquirida a partir de um conjunto de GCP's visíveis na imagem e cujas coordenadas de terreno são conhecidas por levantamentos topográficos de campo. Pretende-se determinar os parâmetros extrínsecos da câmara a partir do estabelecimento da correspondência entre as coordenadas de terreno dos GCP's e as respectivas coordenadas na imagem e rectificar as imagens adquiridas.

A ortorrectificação de imagens constitui também um objectivo do presente capítulo através da importação de um modelo digital de terreno ao *software* de processamento.

O capítulo de calibração está subdividido em 3 subcapítulos fundamentais, um que fornece informação introdutória acerca da rectificação das imagens (3.1 Introdução), um que trata a determinação dos parâmetros extrínsecos da câmara durante a aquisição das imagens (3.2 Orientação externa) e, finalmente, a rectificação das imagens oblíquas através do conhecimento dos parâmetros envolvidos nas equações de colinearidade (intrínsecos e extrínsecos) bem como a ortorrectificação de imagens com a introdução de um modelo digital de terreno adquirido por levantamento topográfico de campo (3.3 Rectificação).

3.2 Orientação externa

A orientação externa constitui o processo de determinação dos parâmetros extrínsecos que posicionam no espaço a posição da câmara relativamente ao terreno (objecto). A relação geométrica entre o terreno e a câmara, estabelecida pela condição de colinearidade, inclui alguns parâmetros relativos às características intrínsecas da câmara, mas também os parâmetros que descrevem a sua posição no espaço, os **parâmetros extrínsecos** ou de **orientação externa**, estes constituem seis parâmetros independentes, três para a posição da câmara (X_L , Y_L e Z_L) e três para a orientação angular da imagem oblíqua (ver Capítulo 1.1.2). A orientação angular é definida por três ângulos, existem dois sistemas para a descrição dos ângulos de orientação: o sistema *tilt*, *swing* e *azimuth* ($t-s-a$) e o sistema omega, phi e kappa (ω , ϕ e κ), cuja transformação entre si é relativamente fácil e descrita por relações matemáticas simples (p. ex. em Wolf & Dewitt, 2000). O sistema omega-phi-kappa apresenta a vantagem de ser mais simples do ponto de vista computacional enquanto o sistema *tilt-swing-azimuth* é mais perceptível e como tal é o sistema mais usual na orientação externa de câmaras oblíquas (Wolf & Dewitt, 2000). Neste trabalho, porém, optou-se por utilizar o sistema omega-phi-kappa, por ser computacionalmente mais simples e por serem os ângulos que entram directamente na matriz rotação da condição de colinearidade (Equações 1.1 e 1.2 Capítulo 1.1.2). O valor numérico da matriz de rotação (Equação 1.3, Capítulo 1.1.2) é, no entanto, igual independentemente do sistema de orientação utilizado.

O sistema de rotação omega (ω), phi (ϕ) e kappa (κ), descreve a rotação segundo os eixos x, y e z (da imagem) relativamente ao sistema de coordenadas de terreno. Por convenção os ângulos de rotação, ω , ϕ e κ , são positivos no sentido anti-horário quando observados do lado positivo do eixo respectivo. A sequência de rotação é também definida pela rotação, em primeiro lugar em torno do eixo x, seguindo-se o y e finalmente em torno do eixo z do sistema de coordenadas imagem (Figura III.1 e Figura 1.4 no capítulo I) (Wolf & Dewitt, 2000).

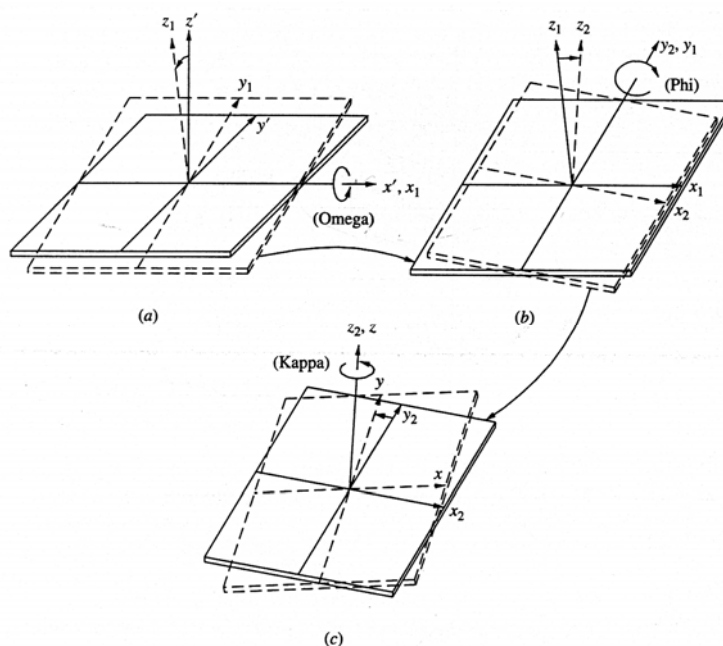


Figura III. I – Rotação sequencial do plano de imagem (posição da câmara) no sistema de rotação ω , ϕ e κ em que a rotação se efectua segundo a ordem de eixos x , y e z (Wolf & Dewitt, 2000).

A determinação dos seis parâmetros de orientação externa, pode ser efectuada por métodos gráficos ou numéricos, para tal é fundamental a existência de pelo menos 3 pontos de controlo (GCP) cujas coordenadas no terreno e na imagem são conhecidas. O procedimento mais comum utiliza o método matemático, para a determinação dos parâmetros da câmara a partir de GCP, designado por recessão espacial pela condição de colinearidade (Clarke & Wang, 1998 e Wolf & Dewitt, 2000).

As equações de colinearidade são não lineares envolvem nove incógnitas (equações III.1 e III.2, descritas no capítulo I.1.2): os ângulos de orientação da câmara que são inerentes aos elementos m 's da matriz rotação, as três coordenadas da posição da câmara (X_L , Y_L e Z_L) e as três coordenadas do ponto no terreno (X_A , Y_A e Z_A). Os parâmetros centro da imagem (x_o , y_o) e distância focal (f), que são constantes para cada câmara e como tal deixam de ser incógnitas a partir do momento em que são determinadas na fase de calibração da câmara.

$$y_a = y_o - f \left[\frac{m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \right] \quad \text{Equação III. 1}$$

$$x_a = x_o - f \left[\frac{m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \right] \quad \text{Equação III. 2}$$

O conhecimento das coordenadas de GCP, cuja relação entre coordenadas de imagem e terreno é conhecida, permite diminuir o número de incógnitas, no entanto a determinação dos parâmetros extrínsecos implica a linearização das equações de colinearidade pelo teorema de

Taylor (Wolf & Dewitt, 2000) ou pelo método directo de linearização DLT (*Direct Linear Transformation*) desenvolvido por Abdel-Aziz e Karara em 1971 (*in*: Heikkila & Silvén, 1997 e Clarke & Wang, 1998). Neste trabalho optou-se por utilizar o método de linearização proposto em Wolf & Dewitt (2000) que utiliza o teorema de Taylor para a dedução de uma série de expressões para o cálculo dos coeficientes (*in*: Wolf & Dewitt, 2000, Appendix D4) envolvidos nas equações através das quais, por processos iterativos, é possível determinar os parâmetros extrínsecos da câmara.

A recessão linear efectua-se através de métodos iterativos que envolvem a formulação das equações de colinearidade linearizadas para cada um dos pontos de controlo, que terão de ser no mínimo três de modo a desenvolver seis equações (2 por cada GCP) para a determinação das seis incógnitas da orientação externa da câmara, a utilização de mais de três pontos de controlo dispersos no terreno/imagem permite otimizar a solução e obter uma estimativa do erro para a solução encontrada. Este método necessita da introdução de uma aproximação inicial para os seis parâmetros, que pode ser facilitada com o levantamento de campo das coordenadas da posição da câmara e por uma estimativa dos seus ângulos de orientação através das relações geométricas entre a câmara e os pontos de controlo no sistema de coordenadas terreno.

3.2.1 *Software* para orientação externa

O sistema de vídeo-monitorização presentemente desenvolvido efectua a orientação externa das imagens através de *software* criado em ambiente Matlab; o programa criado segue o modelo de recessão linear por processos iterativos para a determinação da posição da câmara e os seus ângulos de orientação externa relativamente ao sistema de coordenadas terreno.

A aquisição de imagens de terreno é acompanhada pelo levantamento topográfico da posição da câmara e de pontos de controlo (GCP) que deverão ser, o mais possível, distribuídos ao longo do terreno e reconhecíveis na imagem adquirida pela câmara. A partir da imagem previamente corrigida (processo de calibração descrito no Capítulo 3) identificam-se as coordenadas dos GCP no sistema de coordenadas imagem (Figura III.2), e a sua correspondência no terreno (tabela III.1).

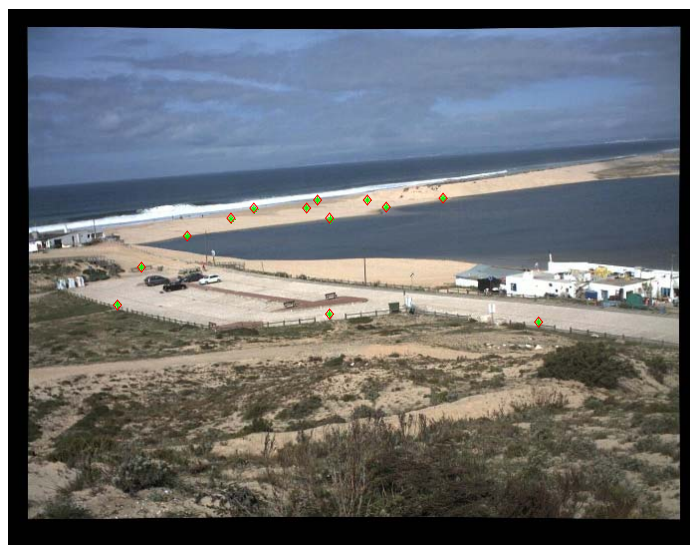


Figura III. 2 – Representação dos GCP numa imagem corrigida dos efeitos de distorção. Exemplo da localização da linha de costa na Lagoa de Albufeira (Silva et al., 2007).

Tabela III. 1 – Exemplo da relação entre coordenadas dos pontos de controlo (GCP) no sistema de coordenadas imagem (x e y) e terreno (X, Y e Z) na Lagoa de Albufeira.

Sistema de coordenadas Imagem		Sistema de coordenadas Terreno			GCP
x	y	X	Y	Z	
-332	-95	-91479.773	-128301.020	1.87	P3
-243	-130	-91514.325	-128243.870	3.10	P5
-44	-130	-91460.075	-128238.920	2.00	P6
-198	-150	-91546.443	-128195.190	3.82	P7
-91	-151	-91510.781	-128193.500	2.99	P8
70	-154	-91465.861	-128186.920	1.98	P9
-70	-167	-91544.597	-128143.010	3.91	PI0
31	-167	-91505.594	-128146.490	2.96	PI1
184	-171	-91461.985	-128138.710	1.99	PI2
-424	-33	-91384.356	-128396.340	7.49	PI4
-471	42	-91352.875	-128425.530	7.22	PI5
-45	62	-91313.004	-128425.430	8.21	PI6
375	78	-91287.506	-128425.170	8.95	PI7

O programa criado, utiliza os parâmetros internos da câmara, determinados durante o processo de calibração, e uma tabela de coordenadas, em Excel p. ex., com a correspondência entre os sistemas de coordenadas dos GCP. Como *input* ao programa é necessário introduzir uma aproximação inicial da posição da câmara (X_L , Y_L e X_L), utilizando-se para tal o resultado do levantamento topográfico das coordenadas da câmara. O processo iterativo para a determinação dos elementos de orientação necessita, ainda assim, de uma aproximação inicial dos ângulos de

rotação da câmara (ω , ϕ e κ), dada a complexidade na determinação dos ângulos externos da câmara, a aproximação inicial é estimada através das relações geométricas entre a posição da câmara levantada e o centro geométrico dos pontos de controlo. Deste modo é possível obter uma estimativa inicial relativamente aproximada para a orientação angular da câmara.

Após a introdução das aproximações iniciais para a orientação externa da câmara, como a posição da câmara (determinada durante a campanha de campo) e a orientação angular (estimada pelo programa) juntamente com os parâmetros intrínsecos obtidos durante a calibração, efectua-se a formulação das equações de colinearidade (Equações III.1 e III.2), cuja descrição se encontra no Capítulo I.1.2, para cada um dos pontos de controlo. As equações são resolvidas iterativamente, pelo método dos mínimos quadrados, através da minimização dos resíduos obtidos entre cada iteração e deste modo convergir para a solução mais provável.

A utilização dos valores adquiridos no campo para a posição da câmara, juntamente com a estimativa para a orientação angular efectuada pelo programa tendo por base as relações geométricas entre os GCP e a posição da câmara, fornecem uma boa estimativa inicial, com uma rápida convergência para a solução final.

Os parâmetros de entrada são, deste modo as coordenadas dos GCP no sistema imagem e no terreno (x , y , X , Y e Z), a distância focal (f determinada na calibração) e a aproximação inicial para a posição e orientação da câmara (X_L , Y_L , Z_L , ω , ϕ e κ), são de seguida resolvidos os sistemas de equações de colinearidade (linearizados) por processos iterativos, após a primeira solução são adicionadas as correcções obtidas de modo a obter-se uma nova aproximação revista, este procedimento é repetido até que a magnitude das correcções sejam insignificantes (Wolf & Dewitt, 2000). Deste procedimento resulta uma solução, que corresponde aos valores mais prováveis para a posição e ângulos de orientação externa da câmara, bem como o resíduo final, que fornece uma estimativa do erro associado à solução encontrada, para o exemplo mostrado na Figura III.2 o erro quadrático médio do ajuste dos GCP foi da ordem de 0.5 m, tendo sido eliminados 4 dos GCP por apresentarem um erro mais elevado que os restantes (acima de 0.80 m). Estes erros mais elevados poderão dever-se a imprecisões na determinação da posição do ponto na imagem, especialmente nos GCP mais distantes nos quais a resolução da imagem dificulta a sua precisa localização.

A rectificação corresponde à transformação de imagens oblíquas em imagens equivalentes verticais, ou imagens rectificadas. A transformação de uma imagem inicialmente oblíqua, numa imagem equivalente vertical implica a transformação geométrica de todos os pontos da imagem a partir do conhecimento dos **parâmetros da câmara**, i.e os parâmetros intrínsecos e extrínsecos, envolvidos na condição de colinearidade. As imagens rectificadas não apresentam os efeitos de distorção das lentes, corrigidos numa primeira fase de calibração, nem os efeitos induzidos pela perspectiva oblíqua, uma vez que se efectua a reprojecção de cada pixel da imagem na posição em que ocorreriam se a imagem fosse vertical, também designada pela sua posição rectificada (Wolf & Dewitt, 2000). A rectificação das imagens pretende relacionar as coordenadas da imagem com as coordenadas de terreno, correspondendo deste modo a uma transformação de um espaço bidimensional (imagem) para um espaço tridimensional (terreno) para que se possam efectuar medições quantitativas na imagem relativamente a um sistema de coordenadas do “mundo real” (Holman et al., 1993). As equações que estabelecem esta relação são as equações da colinearidade (Capítulo I.1.2), sendo que no decorrer da rectificação das imagens foi utilizada uma adaptação da condição de colinearidade descrita por Holland et al. (1997) sob a forma matricial (Equações III.3, III.4 e III.5), que determina as coordenadas da imagem (x_i, y_i) a partir do conhecimento das coordenadas de terreno (X_i, Y_i, Z_i), da posição da câmara (X_L, Y_L, Z_L), da matriz rotação M (Equação I.3, determinada em 3.2) e dos parâmetros internos da câmara (determinados em 2) distância focal (f), ponto principal (x_o, y_o):

$$n = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_1 - X_L & X_2 - X_L & \dots & X_n - X_L \\ Y_1 - Y_L & Y_2 - Y_L & \dots & Y_n - Y_L \\ Z_1 - Z_L & Z_2 - Z_L & \dots & Z_n - Z_L \end{bmatrix} \quad \text{Equação III. 3}$$

$$x_i = x_o - f \frac{[n(1, :)]}{[n(3, :)]} \quad \text{Equação III. 4}$$

$$y_i = y_o - f \frac{[n(2, :)]}{[n(3, :)]} \quad \text{Equação III. 5}$$

As imagens rectificadas, apresentam ainda distorções que podem ser relacionadas com o modulado do terreno, com efeitos de refração, devidos a diferenças de densidade da atmosfera, e com a curvatura terrestre (Wolf & Dewitt, 2000). Estes últimos porém apresentam uma expressão pouco significativa em imagens terrestres (a curtas distâncias) ao contrário da fotografia aérea em que estes efeitos são importantes e como tal devem ser corrigidos através da aplicação de formulações próprias.

As distorções provocadas pelo modulado do terreno são muito importantes em fotografia de curto alcance, e devem-se ao facto da projecção do terreno numa imagem se efectuar no sentido

de um espaço bidimensional para um espaço tridimensional, em que, geralmente se constrange uma dimensão espacial (no espaço tridimensional terreno) por exemplo, utilizando-se um valor fixo para a cota (Holland et al., 1997) que normalmente, para estudos de processos costeiros, corresponde ao nível médio do mar. O aumento da obliquidade das imagens acentua as distorções devidas aos efeitos de relevo sendo que os desvios apresentados são, directamente, proporcionais à obliquidade da imagem materializada pela altitude da câmara relativamente ao nível de referência e à magnitude dos desníveis topográficos.

A magnitude dos desvios devidos (d) relativos ao relevo pode ser quantificada através das equações (III.6 e III.7) em que se determina a distância radial (r') entre a posição da câmara (X_L, Y_L) e o ponto de terreno a corrigir (X, Y) (Equação III.6), seguindo-se a aplicação da equação III.7 (adaptada de Wolf & Dewitt, 2000) que determina o desvio horizontal através da razão entre o produto da distância radial (r') pela altitude do ponto relativamente ao nível de referência (h) e a diferença entre a altitude da câmara (H) e a altitude do ponto de terreno a corrigir (h).

$$r' = \sqrt{(X - X_L)^2 + (Y - Y_L)^2} \quad \text{Equação III. 6}$$

$$d = \frac{r' \times h}{H - h} \quad \text{Equação III. 7}$$

A Figura III.3, representa o efeito do relevo no desvio dos pontos de uma imagem oblíqua, um ponto que se encontre numa cota diferente ao nível de referência utilizado para a rectificação da imagem, irá ser representado com um desvio relativamente à posição que ocuparia se a fotografia fosse vertical. Os pontos de terreno que se encontram ao nível de referência não apresentam desvios na sua projecção, uma vez que o desnível (h) é igual a zero, e como tal o desvio (d) vem também igual a zero (Equação III.7), apresentando-se na posição correcta relativamente a uma imagem vertical (Figura III.3 e III.4).

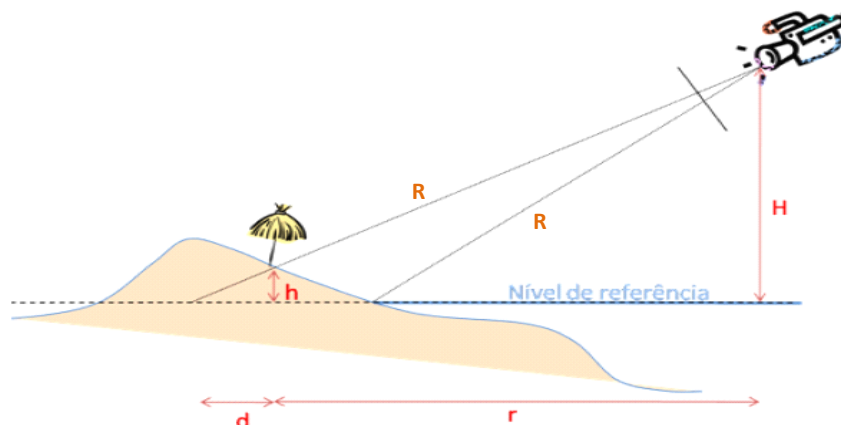


Figura III. 3 – Figura ilustrativa dos desvios devidos ao relevo.

Considerando uma altitude fixa, para a posição da câmara (p. ex. 100m) a distribuição dos desvios da imagem relativamente à distância radial à câmara (R) e às diferenças altimétricas do

relevo (h) (Figura III.4) verifica-se que à medida que a distância radial aumenta a magnitude dos desvios também aumenta significativamente, sendo que por exemplo para um mesmo desnível (ex. 4 m), relativamente ao plano de referência, podemos obter desvios na ordem de 2m até cerca de 40m, com distâncias radiais a variar entre cerca de 50m e 1000m, respectivamente.

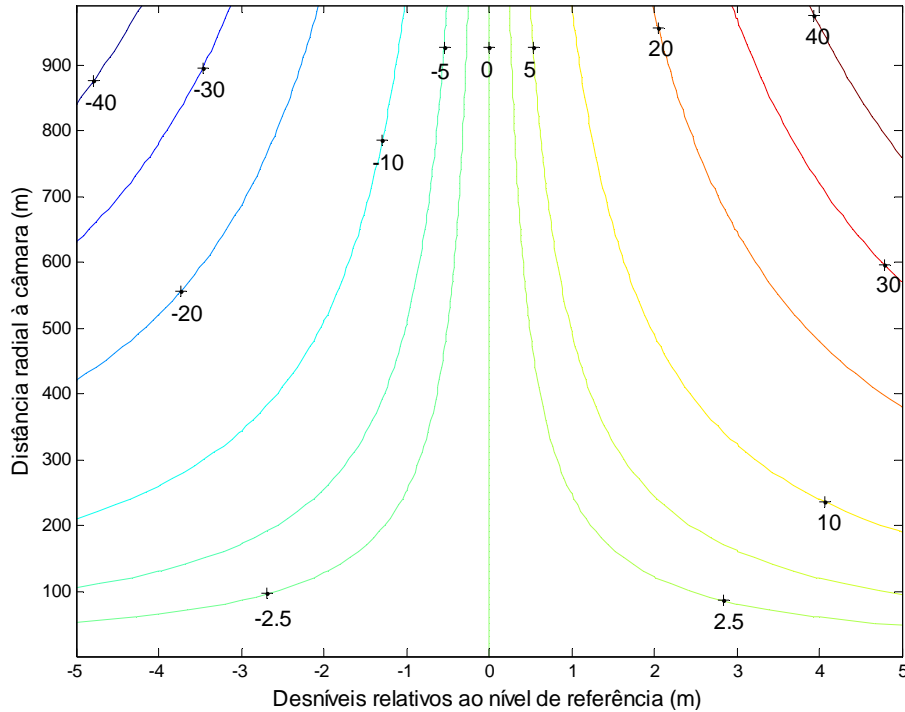


Figura III. 4 – Magnitude dos desvios (em metros) relativamente ao desnível topográfico e à distância radial à câmara, para uma altitude fixa da câmara de 100 m

A correcção das coordenadas de terreno, relativamente aos seus desvios, pode ser efectuada através da aplicação das seguintes equações nas quais, numa primeira fase, se determina a distância radial do ponto desviado (r) (Equação III.8) e o azimute do local de exposição (câmara) relativamente ao ponto a corrigir (α) (Equação III.9). A determinação das coordenadas de terreno corrigidas (X' , Y') segue as equações III.10 e III.11 (in: Wolf & Dewitt, 2000).

$$r = r' + d \quad \text{Equação III. 8}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{X - X_L}{Y - Y_L} \right) \quad \text{Equação III. 9}$$

$$X' = X_L + r \sin \alpha \quad \text{Equação III. 10}$$

$$Y' = Y_L + r \cos \alpha \quad \text{Equação III. 11}$$

Quanto maior a obliquidade da imagem menor será a precisão nos resultados, particularmente devido ao efeitos induzidos pelo relevo. Simultaneamente, aumento da distância à posição da câmara degrada a precisão dos resultados pelo aumento da dimensão que o pixel representa no terreno ao longo de toda a imagem.

A resolução ou dimensão espacial do pixel corresponde à projecção geométrica da dimensão do pixel no terreno, e apresenta componentes distintas consoante a direcção em questão, a componente transversal da dimensão espacial do pixel (Δ_c) corresponde à dimensão do pixel segundo a direcção x da imagem e pode ser determinado pela Equação III.12 (adaptada de Holman & Stanley, 2007) em que R é a distância radial à câmara, dp a dimensão do pixel em unidades métricas e f a distância focal em pixéis ou unidades métricas consoante a expressão utilizada.

A componente longitudinal da dimensão espacial do pixel (Δ_r) corresponde à dimensão do pixel no terreno segundo a direcção y da imagem e é fortemente influenciada pela altitude da câmara (H representada na Figura III.3) (Equação III.13) e distância radial à câmara (R).

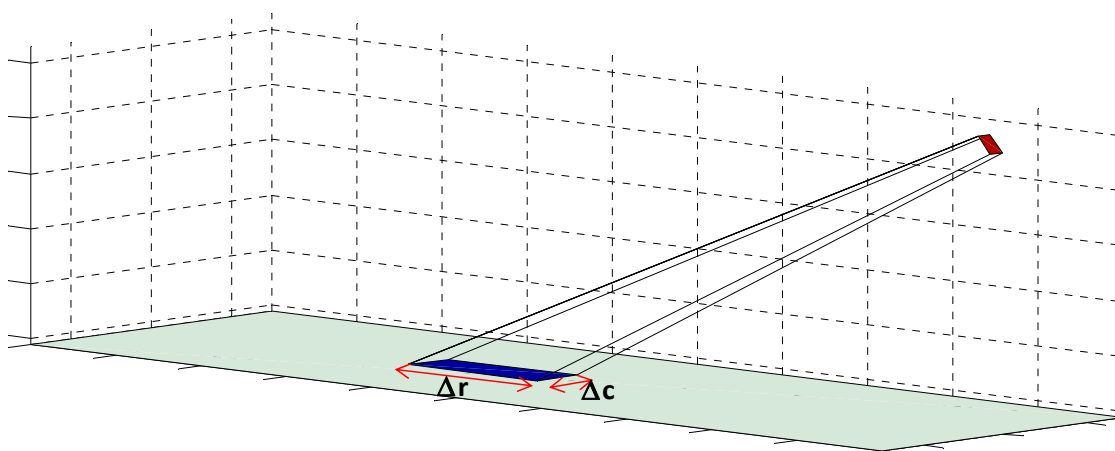


Figura III. 5 – Representação esquemática da resolução ou dimensão espacial do pixel, segundo a componente transversal (Δ_c) e longitudinal (Δ_r).

$$\Delta_c = \frac{R}{f(\text{pixeis})} = \frac{dp \times R}{f(m)} \quad \text{Equação III. 12}$$

$$\Delta_r = \frac{\Delta_c \times R}{H} \quad \text{Equação III. 13}$$

A dimensão do pixel em função da altitude (H) e distância horizontal à câmara (r) (distâncias representadas na Figura III.3) apresenta um comportamento bastante distinto relativamente à sua direcção: (1) a componente transversal da imagem depende quase exclusivamente da distância à câmara sendo que a dimensão espacial do pixel aumenta sucessivamente à medida que nos afastamos da posição da câmara; a influência da altitude da câmara neste caso é pouco significativa e apenas se manifesta em distâncias da câmara muito pequenas (Figura III.6), devido essencialmente ao aumento da distância radial da câmara (R) com o aumento da altitude da câmara em relação ao terreno; (2) na componente longitudinal da imagem (eixo dos yy's) a dimensão espacial do pixel é fortemente influenciada pela altitude da câmara e pela distância à câmara. A dimensão do pixel aumenta consideravelmente com a distância à câmara, no entanto este aumento da pode ser compensado com o aumento da altitude da câmara, uma vez que quanto maior a sua altitude menor é a dimensão do pixel. Por exemplo, a distâncias horizontais da câmara na ordem dos 2000

m, a dimensão do pixel pode variar entre cerca de 500 m, se a câmara estiver muito baixa, e cerca de 40 m, caso a câmara se localize a cerca de 70 m de altitude (Figura III.7).

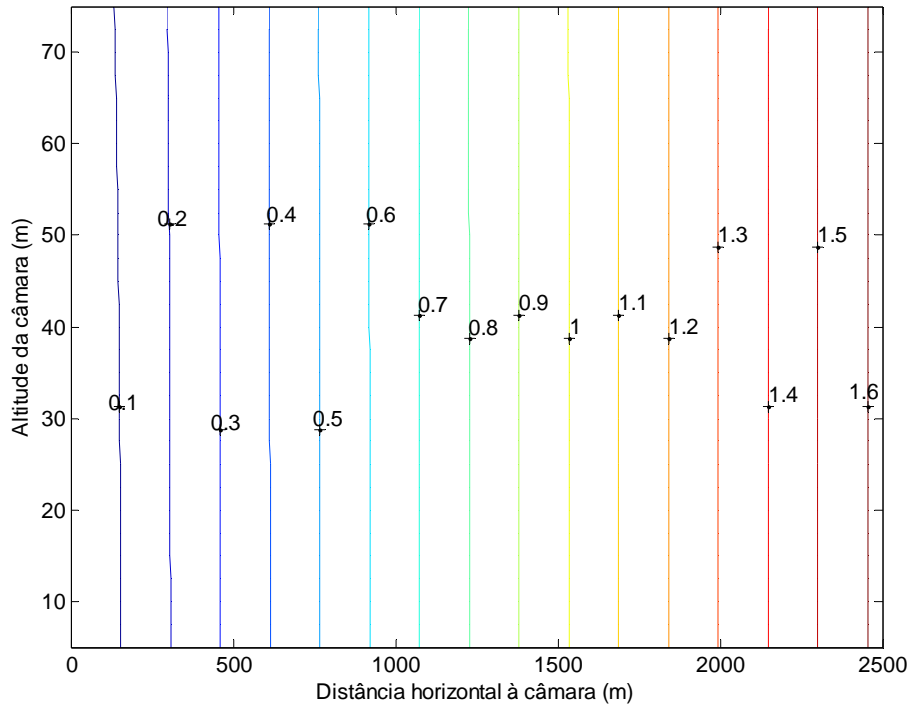


Figura III. 6 – Dimensão espacial do pixel (em metros), segundo a componente transversal, i.e. segundo o eixo x da imagem.

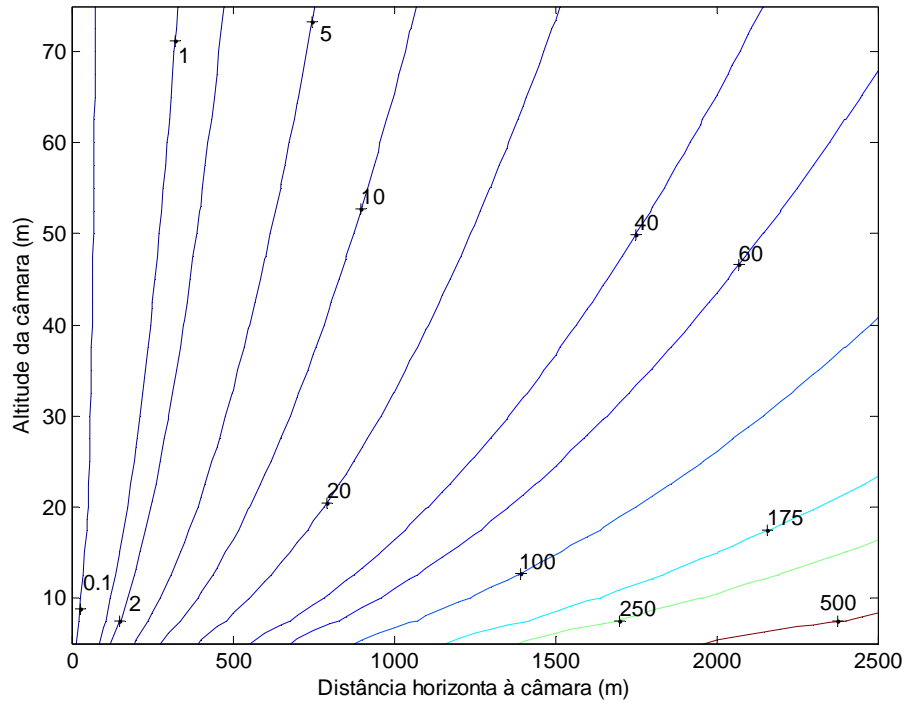


Figura III. 7 - Dimensão espacial do pixel (em metros), segundo a componente longitudinal, i.e. segundo o eixo y da imagem.

O sistema de coordenadas do terreno geralmente não coincide com os eixos das coordenadas da imagem, e usualmente encontra-se alinhado segundo a direcção da linha de costa ou segundo direcções geográficas. Como tal, as dimensões do pixel podem ser decompostas segundo as direcções adoptadas no sistema de coordenadas terreno utilizado, neste caso, a direcção Δ_x corresponde à direcção transversal ao sistema utilizado (segundo o eixo dos x do sistema de coordenadas terreno) e Δ_y à direcção longitudinal do sistema de coordenadas terreno (segundo o eixo dos y). Por exemplo numa imagem em que o sistema de coordenadas utilizado corresponda aos eixos E-W e N-S, Δ_x corresponde à dimensão do pixel segundo a direcção E-W (x) e Δ_y a dimensão do pixel segundo a direcção N-S (y).

As projecções da dimensão do pixel segundo estas direcções podem ser determinadas a partir da Equação III.14 e Equação III.15 (Holman & Stanley, 2007), em que Δ_c e Δ_r correspondem à dimensão do pixel segundo a componente transversal e longitudinal do sistema de coordenadas imagem (Equação III.12 e III.13), respectivamente, e α o azimute da direcção entre os dois sistemas.

$$\Delta_x = \max(|\Delta_c \cos \alpha|, |\Delta_r \sin \alpha|) \quad \text{Equação III. 14}$$

$$\Delta_y = \max(|\Delta_r \cos \alpha|, |\Delta_c \sin \alpha|) \quad \text{Equação III. 15}$$

3.3.1 Software para rectificação de imagem

A rectificação das imagens, no software desenvolvido, parte do conhecimento dos parâmetros internos determinados durante a calibração e dos parâmetros externos determinados na fase de orientação externa e deste modo transformar cada ponto da imagem (pixel) em coordenadas de terreno. À semelhança do que foi efectuado para a correcção da distorção induzida pelas lentes foi definida a função, directa (Equações III.3, III.4 e III.5), que transforma as coordenadas do sistema terreno (imagem rectificada) em coordenadas de imagem (imagem oblíqua) (Figura I.5, função g^{-1}). A partir da definição da função de transformação de coordenadas de terreno em coordenadas imagem criou-se uma estrutura multidimensional espacial de transformação (TFORM structure) em Matlab de modo a permitir o mapeamento inverso (*inverse mapping*) (Capítulo 2.4), para a produção de uma imagem rectificada a partir de uma imagem oblíqua (Figura I.5).

O mapeamento inverso para a geração de uma imagem rectificada efectuou-se a partir da determinação da correspondência de cada um dos pixéis da imagem rectificada (*output space*) na imagem oblíqua (*input space*) (pela função definida) seguindo-se a transferência da informação interpolada do pixel para a sua posição correspondente na imagem rectificada (*output space*) (Figura III.8).

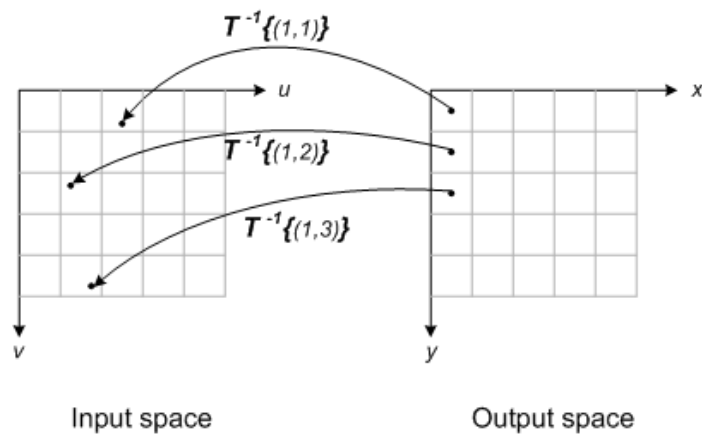


Figura III. 8 – Diagrama que ilustra o procedimento utilizado no mapeamento inverso. Neste caso o *input space* representa a imagem corrigida, o *output space* a imagem rectificadora e T^{-1} as equações de colinearidade (retirado de: Matlab Central, 2007).

O *software* desenvolvido permite a interpolação espacial da informação da imagem rectificadora por diferentes métodos de interpolação: bicúbica, bilinear e vizinho mais próximo (*nearest*) tendo sido utilizado, neste trabalho, o método do vizinho mais próximo por ser o que proporciona uma melhor visualização das fronteiras dos pixels na imagem rectificadora, sendo que os outros métodos produzem imagens com limites mais difusos. A dimensão da célula para a interpolação pode ser definida no *software* no campo *pixel size* bem como a extensão da área a interpolar, tendo sido utilizado um *pixel size* de 0.2m (Figura III.9).

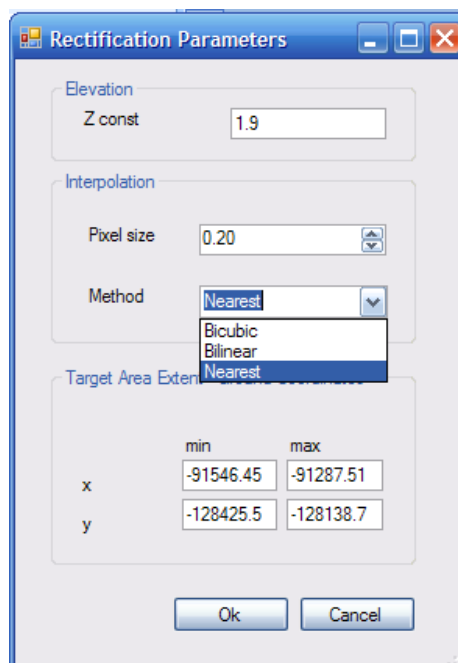


Figura III. 9 – Parâmetros de rectificação utilizados no exemplo da Lagoa de Albufeira.

A componente altimétrica de terreno, ou nível de referência, pode ser definida no programa através da utilização de um valor fixo introduzido como *input* ou calculado pelo próprio *software* a partir da média das cotas dos GCP utilizados na orientação externa, ou por outro lado pode ser

definida através da introdução de modelos digitais de terreno com informação altimétrica para cada ponto (pixel) correspondendo neste caso à ortorrectificação ou rectificação diferencial tratado no subcapítulo seguinte 3.3.2).

No exemplo mostrado neste Capítulo, retirado do exemplo da aplicação de técnicas fotogramétricas na localização da linha de costa da Lagoa de Albufeira (Silva et al., 2007), utilizou-se o nível de água do interior da laguna como nível de referência para a rectificação das imagens (1.9 m, relativamente ao nível médio do mar) medido com o recurso de um transdutor de pressão localizado no interior da laguna, nas proximidades do local em estudo. A escolha deste valor deveu-se ao facto dos desvios relacionados com relevo serem nulos ao longo deste nível, sendo que a posição da linha de costa (neste caso o interior da laguna) é, desta forma, correctamente posicionada na imagem oblíqua (Figura III.10).

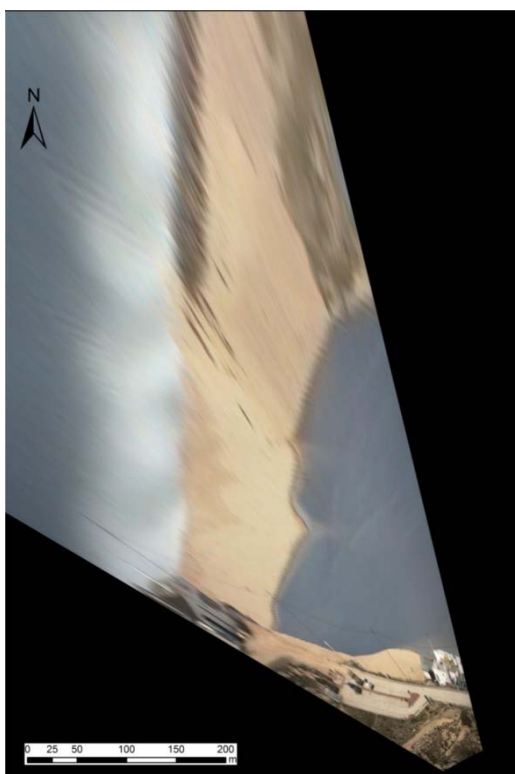


Figura III. 10 – Imagem rectificada da Lagoa de Albufeira, utilizando como nível de referência o nível de água medido no interior da laguna.

A imagem seguinte (Figura III.12) mostra a comparação entre a posição do limite água-terra (no interior da laguna) na imagem e o levantamento topográfico de campo efectuado durante a campanha de referência dos GCP (a vermelho), verifica-se uma correspondência entre a posição da linha de costa na imagem e a posição do nível de água levantada com o recurso a um DGPS-Differential Global Positioning System. Por outro lado o limite de máximo espraiamento das ondas (na parte exterior da barra arenosa) marcado na imagem por uma zona mais escura à esquerda não coincide com a posição do mesmo limite, levantado com DGPS, este desvio deve-se ao facto de o limite de máximo espraiamento não se encontrar à mesma cota do nível de referência utilizado na

rectificação desta imagem e como tal apresenta um desvio na imagem proporcional ao seu desnível relativamente à cota de referência.



Figura III. 11 - Imagem corrigida utilizando o nível de água da laguna, com a implementação dos pontos levantados com DGPS.

Para além da rectificação da imagem, o programa desenvolvido cria um ficheiro de georreferenciação (.tfw) compatível com o software ArcGis, com informação sobre as coordenadas de terreno a que corresponde o canto inferior esquerdo imagem e a dimensão das células representadas, permitindo a georreferenciação correcta da imagem quando adicionada ao ArcMap.

3.3.2 Ortorrectificação

A orrorrectificação consiste na correcção dos efeitos de perspectiva (rectificação) e simultaneamente a correcção dos efeitos do relevo através da introdução da informação altimétrica em cada um dos pontos, desta forma toda a imagem está isenta dos desvios, descritos no subcapítulo 3.3, uma vez que a projecção se efectua não segundo um plano de referência mas sobre uma superfície caracterizada pelo modulado do terreno, resultando deste modo uma imagem com perspectiva ortogonal com escala uniforme (isométrica) sobre toda a sua superfície.

A informação altimétrica do terreno pode ser adicionada ao software de rectificação através de um modelo digital de terreno (MDT), adquirido p. ex. por levantamentos de campo, os por

processos estéreo-fotogramétricos com a aquisição de imagens do mesmo local por diferentes câmaras, ou pela mesma câmara em orientações distintas.

O *software* desenvolvido permite a introdução do modelo de elevação através de uma *grid* com o modelo digital de terreno criado em ArcGis com dados de levantamento topográfico de campo (Figura III.11) ou outros, através da triangulação da informação X, Y e Z contida num ficheiro ou a triangulação usando a informação dos GCP, neste último a qualidade da informação altimétrica é bastante mais limitada uma vez que utiliza um número reduzido de pontos.

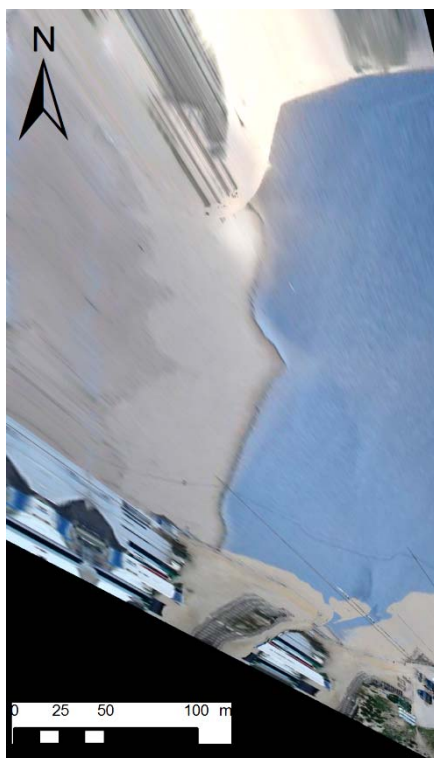


Figura III. 12 – Imagem ortorrectificada através da introdução, no *software* de rectificação, do modelo digital de terreno da barra arenosa da Lagoa de Albufeira, adquirido durante a campanha de campo.

Desta forma é possível a geração de uma imagem ortorrectificada na qual para além da correcção dos efeitos de perspectiva e de distorção foram também corrigidas as distorções provocadas pelo modulado do terreno.

A comparação de resultados entre a ortorrectificação e o levantamento topográfico de campo mostra um ajuste bastante favorável entre o levantamento topográfico do nível de água da laguna e linha de máximo espraiamento das ondas e as respectivas posições na imagem (Figura III.13).

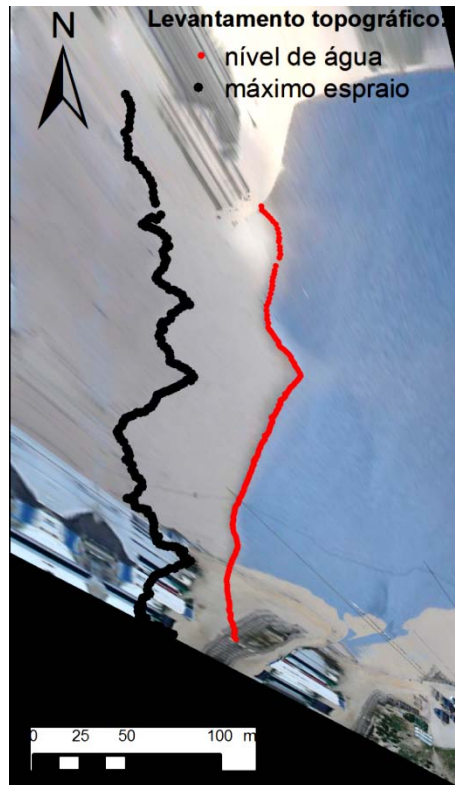


Figura III. 13 - Imagem corrigida utilizando o MDT, com a implementação dos pontos levantados com o DGPS.

O processo de rectificação das imagens oblíquas é um processo matemático que envolve o conhecimento das características ópticas da câmara bem como a sua localização espacial relativamente ao sistema terreno que se pretende estudar.

A determinação das características de orientação externa da câmara através da utilização de GCP, pelo processo designado por recessão linear, por processos iterativos foi facilitada pela introdução de uma estimativa inicial bastante aproximada da realidade. Segundo Heikkila & Silvén (1997) sem uma boa estimativa inicial para estes parâmetros o processo iterativo fica aprisionado num mínimo local do qual resulta uma solução errada. No caso da estimativa da posição da câmara (X_L , Y_L , e Z_L) esta foi determinada por levantamento topográfico de campo, aproveitando a necessidade de levantar as posições dos pontos de controlo, enquanto a estimativa para os ângulos de orientação da câmara (ω , ϕ e κ) relativamente ao terreno foi determinada através das relações geométricas entre a posição da câmara (levantamento topográfico) e o centro geométrico dos pontos de controlo (valor médio das coordenadas X e Y da totalidade dos GCP). Esta aproximação revelou-se bastante eficaz sendo que a convergência para o resultado mais provável foi atingido em poucas iterações, nas várias experiências realizadas com esta aproximação.

Os estudos dos processos costeiros através de sistemas terrestres de vídeo-monitorização apresentam alguns condicionantes nomeadamente a influência do relevo que se torna particularmente significativa em imagens oblíquas de câmara localizadas a baixas altitudes, devido ao elevado desvio horizontal que as morfologias apresentam quando se afastam do nível de referência utilizado. Outro aspecto a considerar nestes estudos é a dimensão ou resolução espacial do pixel segundo a direcção transversal e longitudinal da imagem, no que diz respeito à componente longitudinal (Δr), particularmente sensível à altitude da câmara, quanto maior a obliquidade da imagem, expressa sob a forma de altitude da câmara, maior será a dimensão de terreno considerada em cada um dos pixéis diminuindo a precisão nos resultados. Por outro lado, a componente transversal é (Δc) é essencialmente dependente da distância à câmara, sendo a componente menos degradada com a obliquidade da câmara (Figura III.5 e III.7).

Em estudos costeiros em que o principal objectivo é a localização da linha de costa, utiliza-se geralmente um nível de referência, coincidente com o nível médio do mar na altura de aquisição da imagem (Holland et al., 1997), este procedimento induz um desvio, da posição do limite entre a terra e a água, devido ao relevo nulo (Figura III.3 e III.4) e como tal é utilizado na localização da posição da linha de costa no momento de aquisição de imagem.

A localização da linha de costa, através da sua localização em múltiplas imagens ao longo de um ciclo de maré juntamente com a informação altimétrica dos níveis de maré associados permite o mapeamento da zona entre marés (Plant & Holman, 1997; Alport et al., 1998; Dronkers, 2001; Madsen & Plant, 2001; Aarninkhof, 2003; Aarninkhof et al., 2003; Smith & Brayn, 2007). O nível de maré pode ser determinado por diversos modelos de previsão de marés (ver p. ex. Aarninkhof, 2003) ou através de medições directas, p. ex. com marégrafos, nas proximidades da zona em

estudo, este último método é segundo Smith & Bryan (2007) o procedimento mais preciso na determinação do nível de maré.

A utilização de imagens oblíquas longitudinais à linha de costa permite minimizar os erros de localização da linha de costa induzidos pela dimensão espacial dos pixéis, uma vez que, em imagens adquiridas perpendicularmente à linha de costa, esta virá representada essencialmente na componente transversal (Δc) do sistema imagem (no eixo do x da imagem, Figura III.5) na qual as distâncias espaciais representadas em cada pixel são bastante menores, otimizando desta forma a localização da linha de costa.

A escolha do local para o posicionamento de uma câmara de vídeo, em particular no que diz respeito altitude e à distância, deve ter em conta não só as variações no relevo, mas também a dimensão espacial do pixel mais adequado face aos objectivos que se pretendem estudar.

A ortorrectificação das imagens fornece resultados correctos ao longo de toda a imagem, no entanto a necessidade de incluir a informação altimétrica de toda a área em estudo reduz as potencialidades dos sistemas de vídeo-monitorização, uma vez que se mantém a necessidade de efectuar um levantamento sistemático de toda a área em estudo. Por outro lado a rectificação de imagens tendo como referência o nível médio do mar (ou no exemplo aqui apresentado o nível de água da laguna) permite uma correcta localização da linha de costa, sem recorrer a levantamentos topográficos exaustivos de toda a área de estudo. A colocação da câmara num local fixo faz com que os parâmetros de orientação externa da câmara sejam constantes para todas as imagens e desta forma apenas se torna necessário o conhecimento do nível de maré no momento de aquisição de cada imagem. A aquisição de imagem de modo contínuo e/ou sistemático e a sua rectificação com o nível de referência medido permite a monitorização da posição da linha de costa ao longo do tempo, mesmo em condições adversas (ante e pós-temporal), bem como o estabelecimento de relações entre as modificações morfológicas e os mecanismos forçadores que lhes deram origem.

A criação automática dos ficheiros de georreferenciação para cada imagem foi efectuada pelo software desenvolvido, e permite a directa implementação das imagens rectificadas em ambiente ArcGIS possibilitando uma fácil manipulação das imagens georreferenciadas, bem como, a utilização de uma ampla gama de ferramentas de medição e tratamento de imagem.

4 Aplicação

4.1 Introdução

Após a concretização do desenvolvimento das ferramentas, em *software* próprio, para a calibração de câmaras e processamento de imagens, particularmente no que diz respeito à rectificação de imagens oblíquas a partir do conhecimento da correspondência das coordenadas dos GCP (*Ground Control Points*) entre os sistemas de coordenadas terreno e imagem, foi efectuada uma aplicação experimental no estudo da morfodinâmica de praias. A delimitação da posição linha de costa, que no presente trabalho foi considerada como o limite terra/água, em múltiplas imagens rectificadas juntamente com o conhecimento do nível de maré no momento de aquisição de cada imagem permite a quantificação topo-batimétrica da zona entre marés (Plant & Holman, 1997; Alport et al., 1998; Dronkers, 2001; Madsen & Plant, 2001; Aarninkhof, 2003; Aarninkhof et al., 2003; Smith & Brayn, 2007). Esta quantificação é efectuada através da geração de linhas de contorno ao longo de meio ciclo de maré (Figura IV.1) e que pode ser realizada por processos de classificação automática de imagens baseada em algoritmos de processamento de imagem ou através da digitalização manual do limite entre a água e a terra sobre as imagens georreferenciadas.

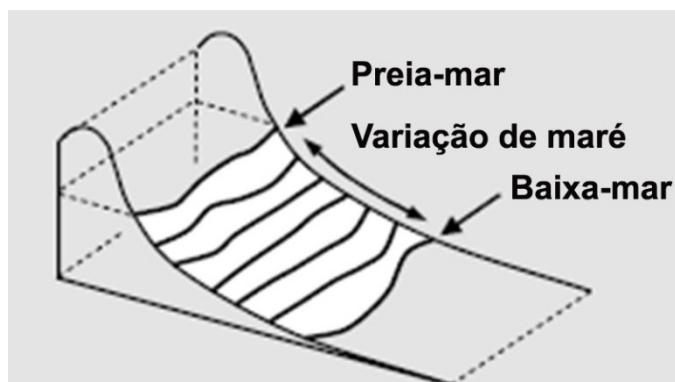


Figura IV. 1- Princípio para o mapeamento da topo-batimetria da zona entre marés (adaptado de Aarninkhof, 2003).

A quantificação dos níveis de maré durante o período de aquisição de imagens pode ser efectuada por medições directas nas proximidades da área de estudo devidamente corridas dos efeitos de variação de pressão atmosférica ou por modelos de previsão de maré a partir de modelos inversos para a dissipação de ondas, determinando os níveis de maré a partir das características da rebentação (p. ex. espraio das ondas) e dos níveis de maré ao largo, entre outros parâmetros envolvidos nos modelos de previsão (Aarninkhof, 2003; Aarninkhof et al., 2003). A complexidade dos modelos de previsão do nível de maré, faz com que seja mais simples e fiável a medição directa dos níveis de maré através de marégrafos ou transdutores de pressão nas proximidades da área em estudo (Smith & Bryan, 2007).

O processamento de dados a partir das imagens pode ser auxiliado por diversos tipos de imagem, dependendo dos objectivos de cada estudo (Fachin et al., 2005; Holman & Stanley 2007;

Van Rijn, 2007), inicialmente desenvolvidas pelo *Coastal Imaging Laboratory*, no decurso do programa Argus, os diferentes tipos de imagens fornecem uma ferramenta bastante útil na localização e quantificação das morfologias costeiras, das quais se destacam, as imagens instantâneas (*snap-shot image*) (Figura IV.2) que representam condições instantâneas e contém pouca informação quantitativa, no entanto auxiliam na interpretação de dados recolhidos. As imagens temporais (*timex images*) correspondem a imagem com exposições de cerca de 10 minutos de vídeo (Figura IV.3 esquerda). Estas imagens representam a média matemática de todas as frames durante um período de 10 minutos e, como tal, eliminam os efeitos singulares das ondas, ou movimentação de pessoas, e apenas torna visível as características médias das ondas sob a forma de bandas brancas. Este tipo de imagem é particularmente útil na localização das zonas de rebentação permitindo o estudo da morfologia submarina como o caso de barras arenosas e canais de retorno. Um outro tipo de imagens geralmente utilizada em estudos de processos costeiros, são as imagens de variância (*variance images*) que correspondem ao desvio padrão da intensidade da luz durante 10 minutos de exposição (Figura IV.4 direita), as imagens de variância apresentam zonas mais brancas que correspondem a zonas onde ocorreram grandes modificações e zonas mais escuras que correspondem às zonas da praia onde ocorreram modificações mínimas ou nulas. Este tipo de imagens permite individualizar facilmente as zonas de rebentação e espraio das ondas das zonas invariantes durante o tempo de exposição.

Existem ainda mais dois tipos de imagens menos usuais, um deles corresponde a uma média de todas as imagens adquiridas durante o dia designada por imagens *Daytimex* e outro tipo de imagem que é criada a partir da amostragem e monitorização da intensidade luminosa de pixéis na imagem (Imagem *Timestack*), a utilidade deste último tipo de imagens prende-se com a possibilidade de avaliar condições oceanográficas visíveis nas imagens como, por exemplo, a velocidade e direcção de ondas e correntes (Fachin et al., 2005).



Figura IV. 2 – Exemplo de imagem Instantânea (*Snap-shot image*) (Van Rijn, 2007).



Figura IV. 3 – Exemplos de imagem temporal (*timex image*) à esquerda e imagem de variância (*variance image*) à direita (Van Rijn, 2007).

A utilização de câmaras não métricas em sistemas de vídeo-monitorização costeira, é actualmente um processo comum devido aos custos envolvidos na utilização de câmaras métricas, nomeadamente com o recurso a fotografia aérea em que os custos associados à realização de voos fotogramétricos são demasiado altos para permitir a monitorização dos processos costeiros com a frequência desejada. Como tal a utilização de câmaras de vídeo IP digitais comuns, disponíveis no mercado a preços acessíveis torna-se uma opção viável e acessível, face ao nível de desenvolvimento tecnológico que este tipo de câmara actualmente possui aliada à possibilidade de se efectuar a sua calibração em laboratório. O desenvolvimento de um sistema de vídeo-monitorização de baixo custo capaz de recolher dados de modo automático, e contínuo, adequado à quantificação e compreensão de diversas morfologias da praia, constitui um passo de elevada importância para os estudos dinâmicos da costa portuguesa, bem como uma ferramenta útil no apoio de decisão em questões relacionadas com a gestão da orla costeira.

4.1.1 Objectivos deste capítulo

O principal objectivo deste capítulo é demonstrar a aplicabilidade do sistema desenvolvido no estudo da morfodinâmica de praias. Neste sentido, o sistema foi utilizado para realizar o levantamento topo-batimétrico de uma zona intertidal na Praia do Alfeite (Estuário do Tejo). De modo a avaliar a precisão do método, os resultados foram comparados com os obtidos através de técnicas clássicas.

4.1.2 Estrutura do capítulo Aplicação

Este capítulo está estruturado de modo a descrever os processos de aquisição de dados de campo relativamente à aquisição de imagens, topografia e níveis de maré, incluindo uma breve introdução às características da câmara de vídeo-monitorização utilizada no decurso deste trabalho (4.2 Aquisição de dados).

Segue-se a descrição do procedimento a seguir para a determinação dos parâmetros externos da câmara a partir dos GCP (4.3 Orientação externa da câmara), para a rectificação das imagens nos diferentes níveis de maré analisados, de 10 em 10 minutos durante a enchente (4.4 Rectificação de imagens), e finalmente o procedimento para a quantificação da topo-batimetria da zona intertidal a partir da digitalização do limite água/terra nas diferentes imagens (4.5 Levantamento topo-batimétrico da zona entre marés). Ainda neste capítulo, apresenta-se uma breve discussão acerca da aplicação prática realizada e a sua aplicabilidade nos estudos de processos litorais (4.6 Discussão).

4.2 Aquisição de dados

4.2.1 Características da câmara de vídeo-monitorização

A câmara de vídeo utilizada neste sistema é uma câmara digital IP, i.e. com capacidade de transmissão de dados directamente via internet, com uma resolução de 1.2 mega pixéis e elevada resistência em condições adversas de exterior, como o caso de tempestades ou chuvas intensas. A utilização de uma câmara com estas características tem a vantagem de só necessitar de uma ligação de rede Ethernet ou RDIS no local, dispensando a existência de um computador.

A câmara de vídeo utilizada, modelo M10D da marca Mobotix, têm uma resolução de 1280 x 960 pixéis e permite a aquisição eficaz de imagens com elevada frequência. A câmara é constituída por duas lentes distintas, uma com uma distância focal de 8 mm, sem zoom, e outra a outra com uma distância focal de 25 mm e zoom óptico. Face aos objectivos de monitorizar uma zona de praia extensa foi utilizada a lente com menor distância focal por ser a mais abrangente, por um lado, e por outro lado por corresponder a uma lente fixa sem zoom e como tal as suas características ópticas intrínsecas, nomeadamente a distância focal (f_c) e ponto principal (cc), são constantes para todas as imagens.

A lente utilizada (8 mm) é caracterizada por uma abertura de 2.0 e um ângulo de 45° na componente horizontal e 34° na componente vertical da imagem que corresponde segundo Wolf & Dewitt (2000) à classe das lentes com ângulo normal. A aplicação da equação IV.1, para a determinação das dimensões reais do sensor CCD (*Charged-Coupled Device*) indica que o CCD utilizado tem cerca de 6.63 mm segundo a horizontal e 4.89 mm a vertical.

$$d = 2f \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad \text{Equação IV. 1}$$

em que d é a dimensão do CCD, f a distância focal da lente (obtida a partir das características técnicas da lente) e α o ângulo de abertura da lente. Pela relação entre a dimensão do CCD determinada e a resolução da imagem a dimensão do pixel no CCD é aproximadamente de 0.0052 mm, segundo as duas direcções da imagem.

A distância focal efectiva da câmara, é porém determinada durante o processo de calibração da lente (Capítulo 2) da qual resultou uma distância focal média de 1535 pixéis ou, de acordo com a dimensão do pixel, de 7.83 mm.

4.2.2 Aquisição de dados

A aquisição das imagens foi efectuada com a câmara instalada num poste e direccionada obliquamente relativamente à linha de costa da praia estuarina do Tejo, Praia do Alfeite.

A Praia do Alfeite localiza-se na restinga do Alfeite, a noroeste do Seixal e estende-se por cerca de 2600 m desde a Quinta do Alfeite até à Ponta dos Corvos, a praia é limitada pela própria restinga e por um raso de maré areno-vasoso com cerca de 300 m de largura (Freire, 2003) (Figura IV.4).

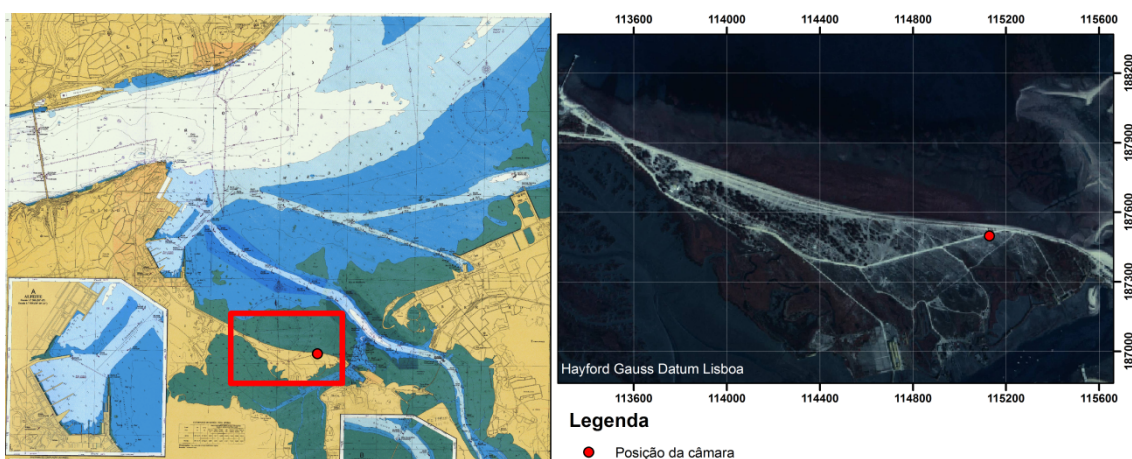


Figura IV. 4 – Enquadramento geográfico da praia do Alfeite no Estuário do Tejo.

A instalação da câmara de vídeo foi efectuada a uma cota de cerca de 8 m relativamente ao nível médio do mar e direccionada obliquamente relativamente à linha de costa, apontando em direcção a noroeste (Figura IV.5). Foi utilizado um gerador como fonte de energia e a transmissão de dados efectuou-se directamente para um computador portátil ao qual a câmara se encontrava ligada através de um cabo Ethernet, utilizando o software próprio da câmara. Este software permite configurar a forma de aquisição das imagens, nomeadamente no que diz respeito às frequências de aquisição e resolução.



Figura IV. 5- Instalação da câmara de vídeo obliquamente à praia, num local elevado.

Aquisição de imagens efectuou-se durante parte da enchente do dia 1 de Junho de 2007 desde as 12:03 até às 16:14, com uma frequência de 1 minuto, resultando deste modo cerca de 254 imagens com uma resolução de 1.2 mega pixéis. Devido a erros na programação da aquisição de imagens e da deslocação da câmara na fase final de aquisição, o registo útil de imagens foi das 12:20 às 15:50 ao qual correspondem 210 imagens. A baixa-mar e preia-mar no dia de aquisição de imagens (marés vivas) ocorreram, respectivamente, às 9:41 e 16:15 de acordo com as previsões *online* de maré do Instituto Hidrográfico (2007).

A coordenação dos pontos de controlo (*Ground Control Points* - GCP) foi efectuada com GPS Trimble 4000 SST entre as 10:00 e as 16:00, utilizando como referência uma estação permanente localizada na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, a 12 km de distância da praia do Alfeite. O sistema de referência utilizado foi o *Hayford Gauss Datum* Lisboa (coordenadas militares) e altitudes ortométricas (Figura IV.6). Os posicionamentos obtidos para os GCP correspondem ao topo da antena de GPS por ser a estrutura mais facilmente identificável na imagem e encontram-se na Tabela IV.1, juntamente com os respectivos desvios padrão e hora de aquisição de cada um dos pontos de controlo.

Tabela IV. 1- Resultados da referência dos pontos de controlo e respectivos desvios padrão.

Nome	M (m)	σ_M	P (m)	σ_P	H'	σ_H	Hora
P2	115007	0.07	187558.52	0.02	1.1	0.03	12:13
P3	115007	0.04	187538.14	0.01	1.2	0.01	12:22
P4	114932	0.02	187542.54	0.01	1.5	0.01	12:49
P5	115054	0.01	187527.47	0	2	0.01	13:24
P6	115109	0.02	187522.63	0.01	2.2	0.01	13:56
P7	115120	0.02	187505.49	0	3.7	0.01	14:18
P8	115114	0.02	187500.9	0.01	3.5	0.01	14:50
P9	115087	0.01	187503.85	0	3.4	0	15:19

A hora de aquisição de cada ponto de controlo é essencial para a localização da posição do GPS na imagem respectiva e deste modo identificar os pontos de controlo nas imagens, no decurso deste trabalho (Figura IV.7) e procurou-se distribuir homogeneamente, os GCP, ao longo da área a monitorizar (Figura IV.8).



Figura IV. 6 – Levantamento topográfico com GPS dos pontos de controlo (GCP), necessários à rectificação das imagens.



Figura IV. 7 – Localização do GPS na imagem corrigida de modo a definir um ponto de controle (GCP) nessa posição.



Figura IV. 8 – Imagem corrigida dos efeitos de distorção da lente, com a localização dos GCP coordenados (a vermelho).

O estabelecimento da correspondência entre os GCP efectuou-se através da localização da antena do GPS nos diferentes pontos em que este esteve estacionado, pelo conhecimento da hora a que o ponto foi adquirido e a sua identificação na respectiva imagem corrigida, foi assim criada uma tabela com as coordenadas dos diferentes GCP na imagem (x, y) e no terreno (X, Y, Z) (Tabela IV.2).

Tabela IV. 2 – Tabela de coordenadas dos pontos de controlo (GCP) no sistema de coordenadas imagem (x e y) e terreno (X, Y e Z) no sistema de coordenada *Hayford Gauss Datum Lisboa* (coordenadas militares).

Sistema de coordenadas Imagem		Sistema de coordenadas Terreno (HG-DL)			GCP
x	y	X	Y	Z	
-71	-128	115007.3	187558.5	1.11	P2
-290	-89	115006.5	187538.1	1.21	P3
-446	-89	114931.9	187542.5	1.54	P4
-197	-73	115054.1	187527.5	2.01	P5
595	-45	115108.5	187522.6	2.22	P6
327	259	115120	187505.5	3.66	P7
-425	295	115113.9	187500.9	3.46	P8
-562	47	115087	187503.8	3.44	P9

A aquisição de imagens foi acompanhada por um levantamento topográfico de parte da área visível na imagem, o levantamento topográfico foi efectuado com uma estação total, Leica TPS400, estacionada nas proximidades da câmara (Figura IV.9) por levantamento de perfis transversais à praia dispersos ao longo da área visível nas imagens (Figura IV.10) até uma distância de cerca de 400 m da câmara.

A posição aproximada da câmara de vídeo foi levantada, com a estação total, tendo sido obtidas as seguintes coordenadas: $X_L=115129.08$; $Y_L=187498.05$ e $Z_L=7.8$ (*Hayford Gauss Datum Lisboa*).



Figura IV. 9- Levantamento topográfico da área visível nas imagens com recurso a uma estação total.

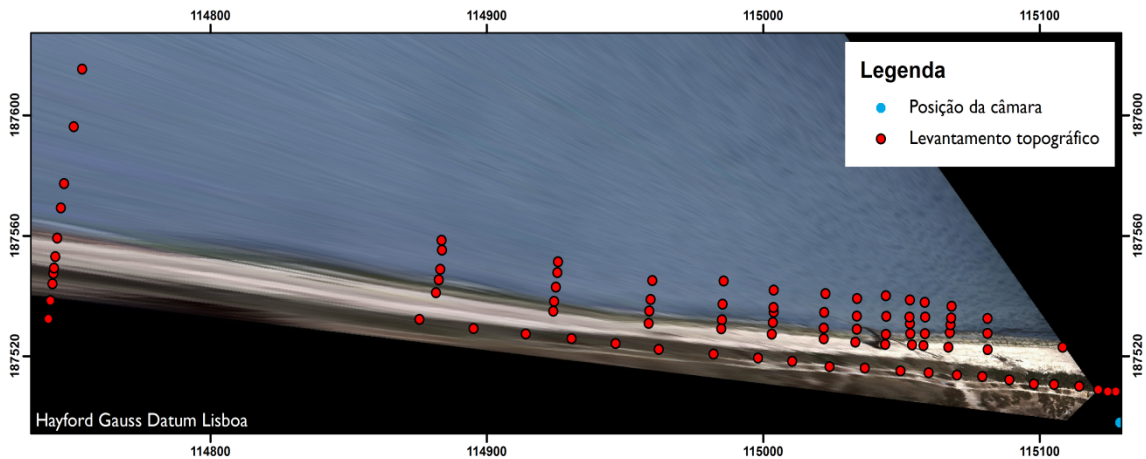


Figura IV. 10 – Localização dos perfis topográficos transversais levantados com estação total, a imagem de fundo corresponde a uma imagem da praia do Alfeite rectificada.

Os níveis de maré foram medidos por um transdutor de pressão colocado numa estrutura metálica cravada dentro de água, nas proximidades da câmara (Figura IV.II), registando valores de pressão com uma frequência de 1Hz desde as 12:27 até às 16:00. Para a correcção da pressão atmosférica, foi colocado um barómetro nas proximidades da câmara, a adquirir dados de pressão atmosférica, a 1Hz, durante o mesmo período de tempo.

Durante a enchente o transdutor de pressão foi deslocado 4 vezes, tendo adquirido dados relativos à pressão da coluna de água em 5 posições distintas (em Anexo A), sendo que cada uma das posições foi referenciada com a estação total para se proceder à caracterização geral do nível de água relativamente ao nível médio do mar.

A Figura IV.12, representa a variação do nível de maré durante a campanha de campo, relativamente ao nível médio do mar. Os resultados encontram-se corrigidos dos efeitos da pressão atmosférica que, neste caso, se podem considerar negligenciáveis, face ao reduzido período de tempo de medição.



Figura IV. 11- Transdutor de pressão colocado dentro de água para a determinação do nível de maré.

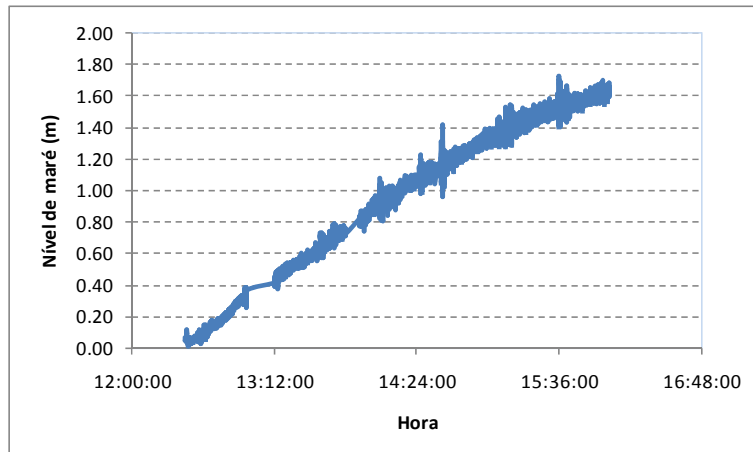


Figura IV. 12 – Variação do nível de maré durante a aquisição de imagens. Os níveis de maré encontram-se referenciados ao nível médio do mar e corrigidos da pressão atmosférica.

4.3 Orientação externa da câmara

A caracterização dos parâmetros externos da câmara efectuou-se, no *software* desenvolvido, utilizando como variáveis de entrada as características intrínsecas da câmara (determinadas na calibração) e as coordenadas dos pontos de controlo (GCP) no sistema de coordenadas imagem (x e y) e terreno (X, Y e Z) (Tabela IV.2). No decurso desta operação foi ainda necessário definir uma aproximação inicial para as coordenadas da câmara utilizando-se como *entrada* o resultado do levantamento topográfico ($X_L=115129.08$; $Y_L=187498.05$ e $Z_L=7.8$).

Os resultados obtidos com a totalidade dos GCP levantados (Figura IV.13) apresentaram uma rápida convergência (4 iterações) mas um erro quadrático médio para o ajuste elevado, na ordem dos 4.7 m. A observação dos detalhes do erro para cada um dos GCP (Figura IV.14) permite

identificar os pontos com maior erro e eliminá-los do processo para a determinação da orientação da câmara.

Desta forma não foram considerados os pontos P6, P7, P8 e P3 no processo de determinação da orientação externa, resultando desta forma um erro quadrático médio de 0.98 m em 4 iterações. O resultado final para os parâmetros de orientação externa (Figura IV.15) da câmara foi a posição: $X_L = 115129.893$, $Y_L = 187497.915$ e $Z_L = 7.75$ e os ângulos de orientação externa: $\omega = 73.42$; $\phi = 240.88$ e $\kappa = -4.50$.

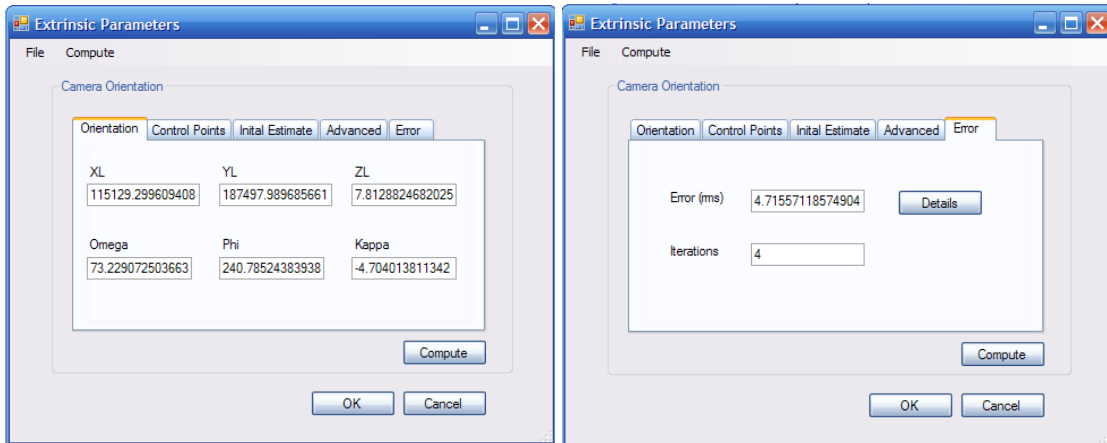


Figura IV. 13 – Resultados da orientação externa obtidos com a totalidade dos GCP, à esquerda os resultados para a posição e orientação da câmara e à direita o erro quadrático médio e o número de iterações necessárias para convergir para o resultado.

ID	ImageX	ImageY	GCPX	GCPY	GCPZ	Error
P2	-72	-128	115007.3...	187558.5...	1.11	3.337213...
P3	-290	-89	115006.5...	187538.1...	1.21	2.890175...
P4	-447	-89	114931.9...	187542.5...	1.54	3.304745...
P5	-198	-73	115054.1...	187527.4...	2.01	0.637263...
P6	596	-44	115108.5...	187522.6...	2.22	8.815690...
P7	331	261	115119.9...	187505.4...	3.66	6.557907...
P8	-425	293	115113.8...	187500.9	3.46	4.803075...
P9	-563	48	115087.0...	187503.8...	3.44	1.811977...

Figura IV. 14 – Detalhes do erro associado a cada um dos GCP.

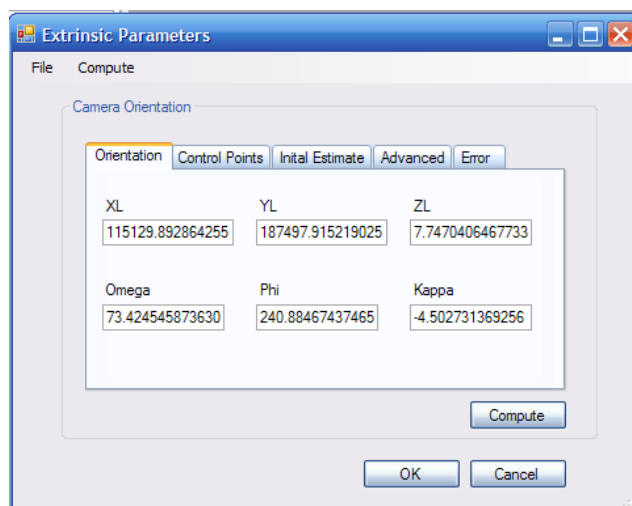


Figura IV. 15 - Resultados da orientação externa da câmara durante a aquisição de imagens na praia do Alfeite.

4.4 Rectificação de imagens

A rectificação de cada uma das imagens foi efectuada utilizando como nível de referência o nível de maré medido, com o transdutor, na hora em que a fotografia foi adquirida (Figura IV.16). Foi efectuada a rectificação de imagens de 10 em 10 minutos, desde a imagem das 12:20 até à imagem adquirida às 15:50. Durante a aquisição da primeira imagem o transdutor de pressão não se encontrava ainda a adquirir dados, como tal o seu nível de maré foi interpolado.

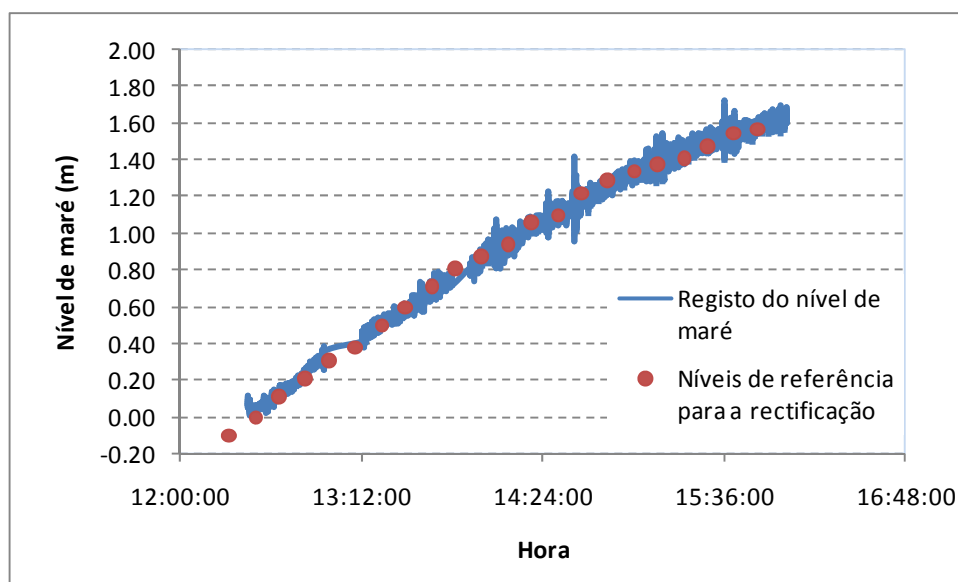


Figura IV. 16 - Registo de maré com os níveis de referência (nmm) utilizados para a rectificação das imagens de 10 em 10 minutos.

Por exemplo a imagem adquirida às 13:30, corresponde a um nível de maré de cerca de 0.6 m. A mesma imagem corrigida dos efeitos de distorção (Figura IV.17) é rectificada utilizando os parâmetros de orientação externa determinados pelos GCP e o nível de referência constante para a rectificação ao longo de toda a imagem de 0.6 m, a dimensão do pixel utilizada foi 0.2 m, correspondendo à máxima resolução alcançável face à resolução inicial da imagem e o método de interpolação “nearest” (Figura IV.18).



Figura IV. 17- Imagem corrigida dos efeitos de distorção da lente, adquirida quando o nível de maré se encontrava a cerca de 0.6 m, relativamente ao nível médio do mar.

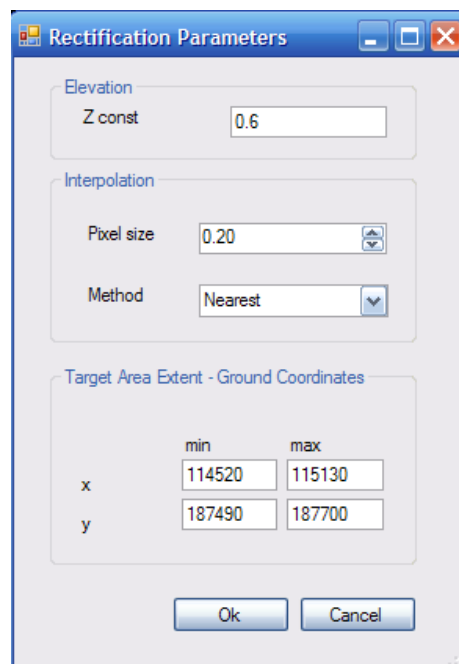


Figura IV. 18 – Menu de definição dos parâmetros de rectificação das imagens.

Como resultado do processo de rectificação da imagem anterior, obteve-se uma imagem rectificada para o nível de referência 0.6 m (nível médio do mar) (Figura IV.19) e um ficheiro de georreferenciação (.tfw), com o mesmo nome, que contém a informação sobre o sistema de coordenadas da imagem rectificada, nomeadamente, as coordenadas de terreno a que corresponde o canto inferior esquerdo da imagem e a dimensão das células representada. Este ficheiro permite a implementação da imagem em ArcGis fazendo com que esta fique automaticamente georreferenciada para o sistema de coordenadas utilizado nos GCP.

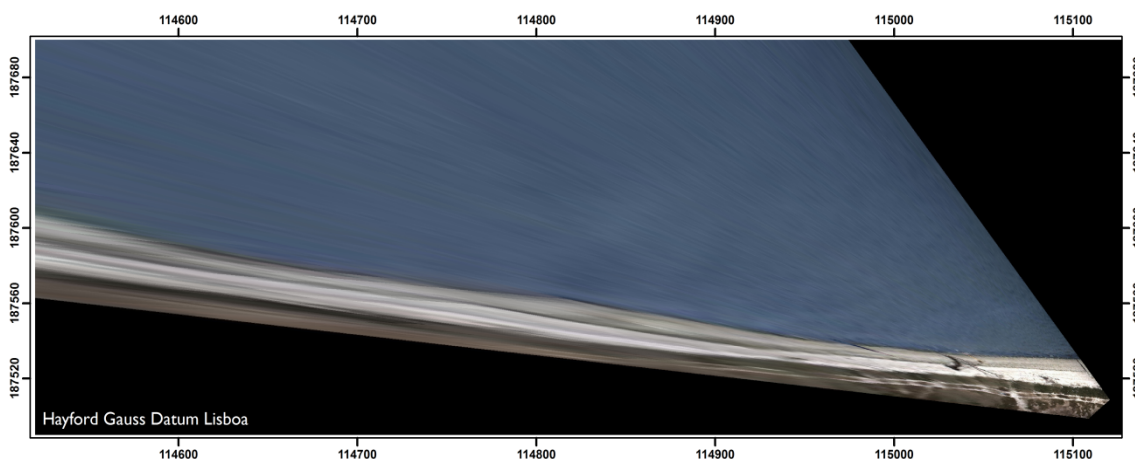


Figura IV. 19 – Imagem rectificada para o nível de maré 0.6 m (nmm).

Este procedimento foi repetido para as imagens de 10 em 10 minutos, desde as 12:20 até às 15:50, durante a enchente, resultando desta forma 22 imagens rectificadas para o nível de referência medido na altura da sua aquisição.

4.5 Levantamento topo-batimétrico da zona entre marés

A delimitação da posição linha de costa foi efectuada para cada uma das imagens rectificadas, através de digitalização manual do limite entre a água e a face de praia. A digitalização do limite água/terra foi efectuada em ArcGis a uma escala de 1:700 nas proximidades da câmara (até 250 m de distância) e a uma escala aproximada de 1:2000 para distâncias à câmara superiores a 250 m. A necessidade de utilizar duas escalas diferentes na digitalização da posição da linha de costa prende-se com o aumento da dimensão espacial do pixel ao longo da imagem e faz com que a maiores distâncias da câmara, devido à degradação resolução geométrica da imagem com a distância, o limite água/terra seja mais difuso e como tal mais facilmente identificável a escalas menores (ver p. ex Figura IV.19).

A cada uma das linhas digitalizadas foi atribuída a cota correspondente ao nível de maré no momento em que a imagem foi adquirida, e desta forma obteve-se uma série de linhas de contorno para os diferentes níveis de maré, de 10 em 10 minutos, durante a maré enchente (Figura IV.20). A

digitalização da posição da linha de costa para cada uma das imagens encontra-se em anexo (Anexo B).

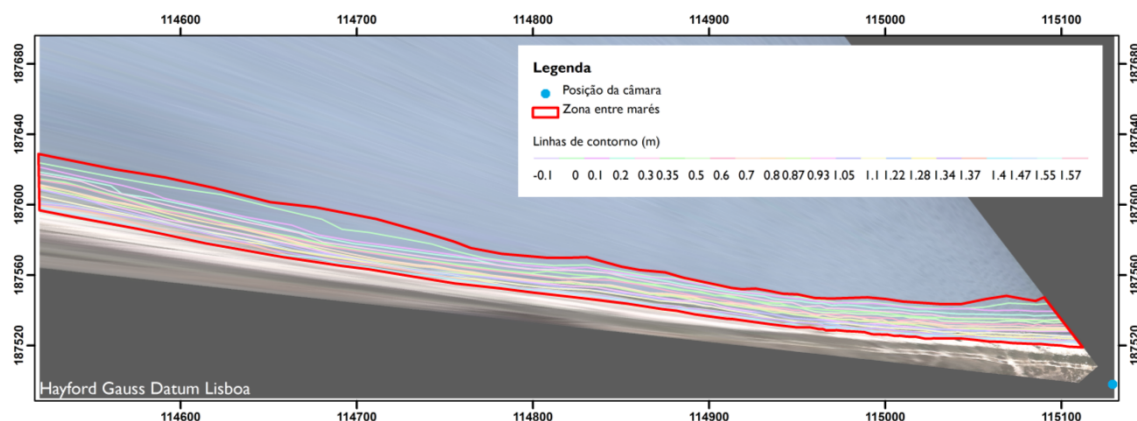


Figura IV. 20 – Linhas de contorno para os diferentes níveis de maré, de 10 em 10 minutos.

A quantificação topo-batimétrica da zona entre marés pode ser efectuada a partir das linhas de contorno criadas e desta forma gerar um modelo digital de terreno (MDT) da zona entre marés, em ambiente Sig (ArcGIS) foi gerado um MDT da zona intertidal por triangulação em malha irregular (TIN - *Triangulated Irregular Network*) (Figura IV.21)

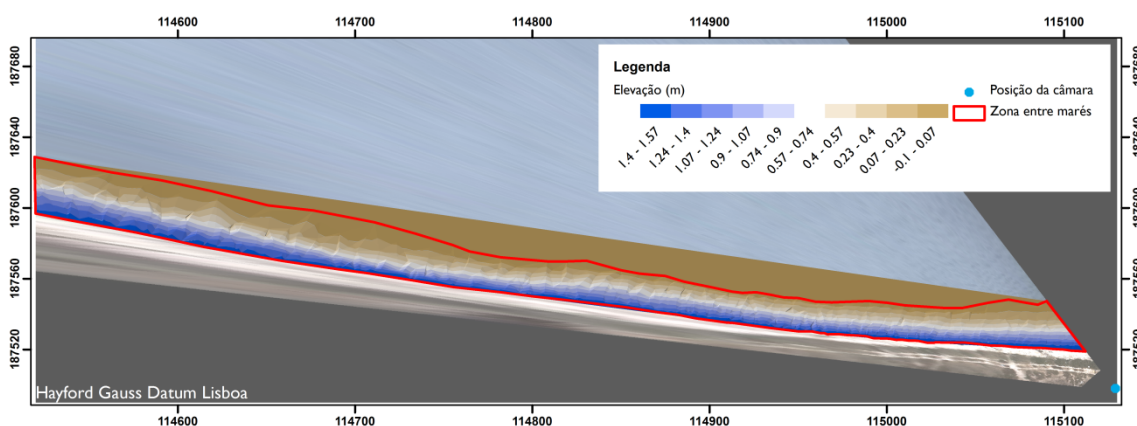


Figura IV. 21 – Modelo digital de terreno da zona entre marés, criado a partir das linhas de contorno.

Para a comparação dos resultados obtidos a partir das linhas de contorno das imagens, foram comparados os resultados do mdt criado com os perfis topográficos levantados com a estação total (localização dos perfis na Figura IV.10). Foram interpolados sobre o mdt criado a partir das imagens, perfis transversais à praia localizados sobre os levantamentos topográficos realizados com a estação total, as Figuras IV.22 à Figura IV.28 mostram a sobreposição dos resultados obtidos e os pontos levantados em cada um dos perfis topográficos identificados pela distância da sua origem à posição da câmara de vídeo.

Foram ainda calculados os desvios quadráticos médios (rms) entre cada par de perfis obtidos ao longo da área estudada (Figura IV.29 e Figura IV.30) até uma distância de 390 m relativamente à posição da câmara, sendo que rms médio para a totalidade dos perfis foi de 0.08 m.

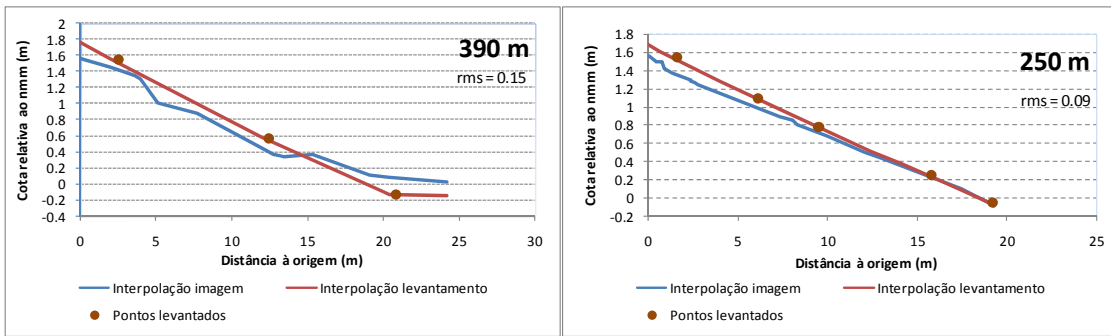


Figura IV. 22- Perfis topográficos à distância de 390 m e 250 m da câmara (à esquerda e direita, respectivamente).

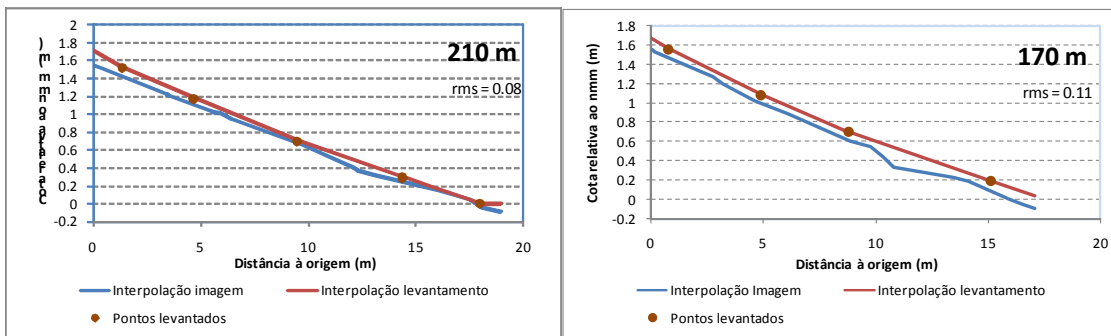


Figura IV. 23 - Perfis topográficos à distância de 210 m e 170 m da câmara (à esquerda e direita, respectivamente).

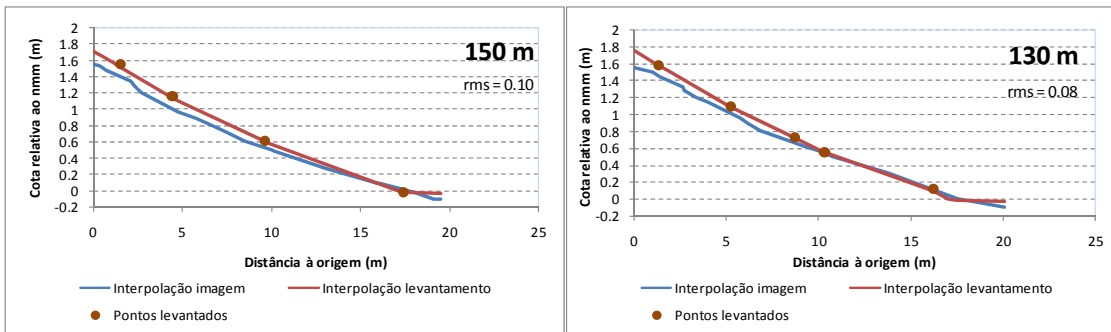


Figura IV. 24 - Perfis topográficos à distância de 150 m e 130 m da câmara (à esquerda e direita, respectivamente).

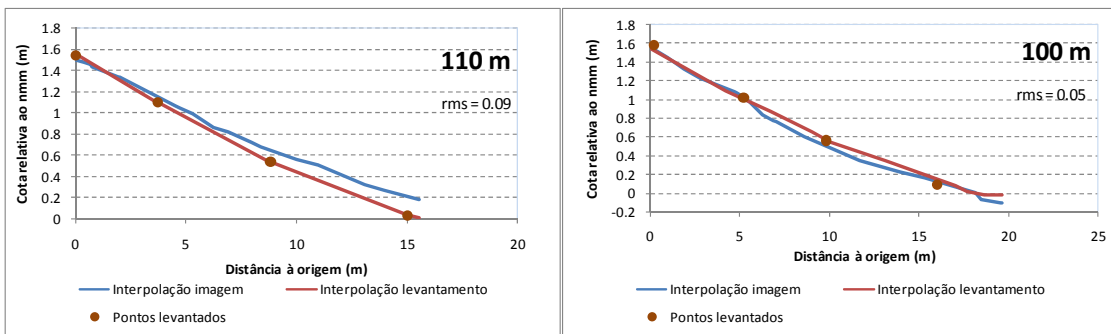


Figura IV. 25 - Perfis topográficos à distância de 110 m e 100 m da câmara (à esquerda e direita, respectivamente).

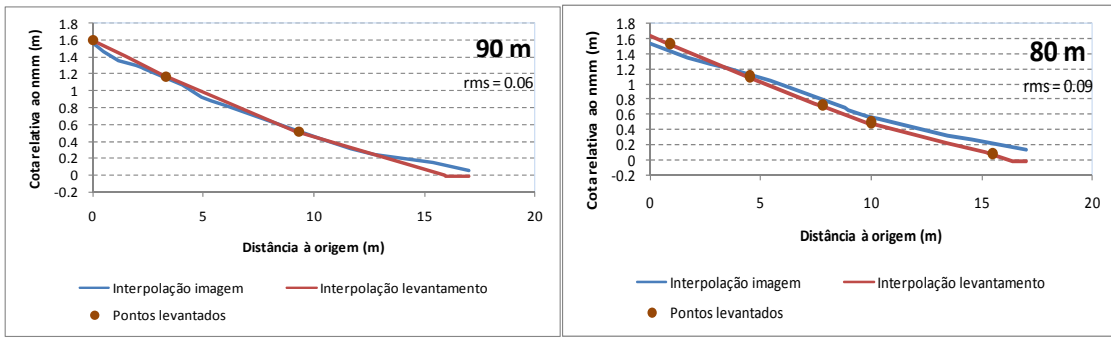


Figura IV. 26 - Perfis topográficos à distância de 90 m e 80 m da câmara (à esquerda e direita, respectivamente).

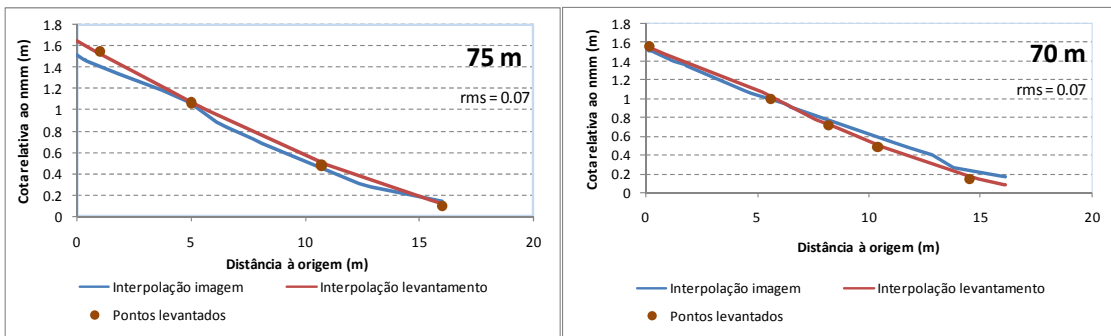


Figura IV. 27 - Perfis topográficos à distância de 75 m e 70 m da câmara (à esquerda e direita, respectivamente).

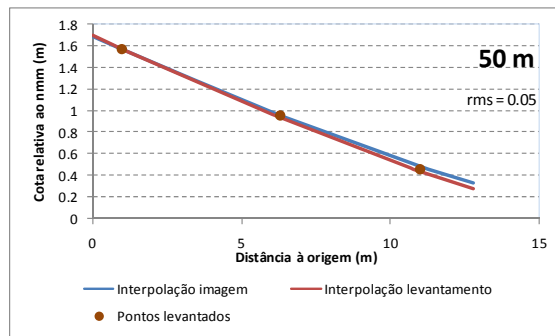


Figura IV. 28 - Perfis topográficos à distância de 50 m da câmara.

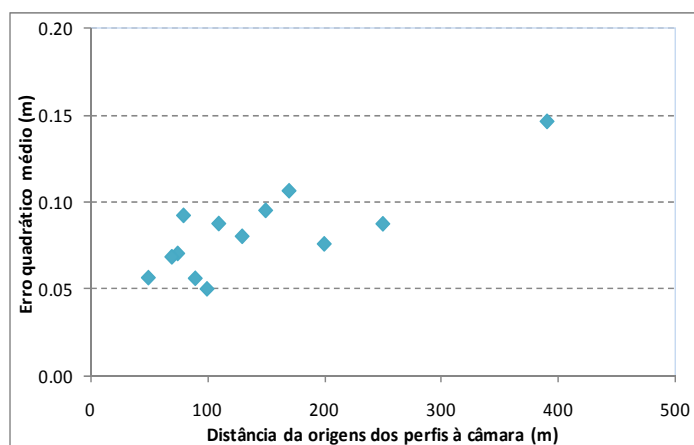
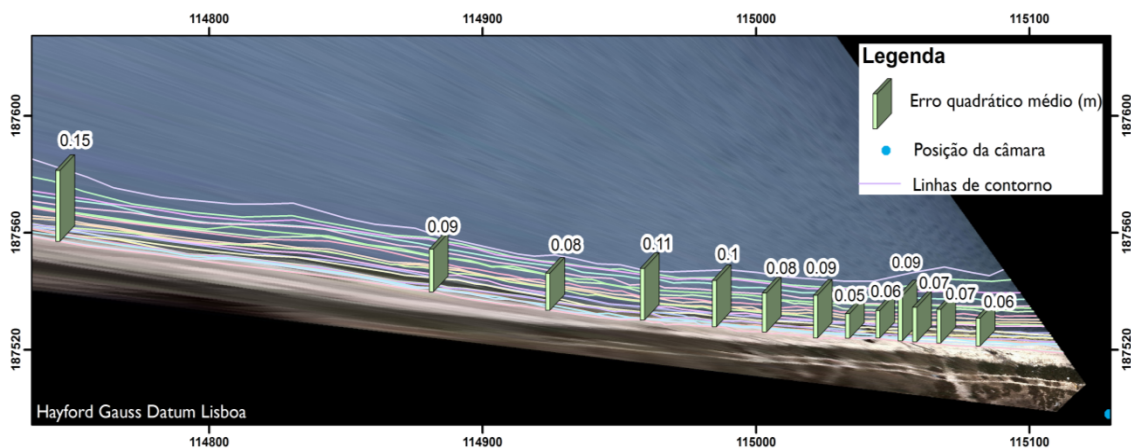


Figura IV. 30 – Distribuição do erro quadrático médio em função da distância à câmara.

4.6 Discussão

O presente capítulo constituiu a aplicação do sistema de vídeo-monitorização desenvolvido a um problema concreto, tendo se obtido resultados muito satisfatórios no que diz respeito ao levantamento topográfico e batimétrico da zona entre marés e na localização da posição da linha de costa, i.e. o limite entre a água e a terra.

A aquisição de imagens a uma frequência de 1 minuto revelou ser apropriada para a localização da linha de costa em imagens instantâneas, embora a aquisição de imagens a frequências mais elevadas pudesse ser útil para a utilização de imagens temporais (*timex*) que correspondem a médias de todas as frames em determinado intervalo de tempo, permitindo eliminar efeitos pontuais das ondas ou outras movimentações pontuais, no presente trabalho optou-se por utilizar imagens do tipo instantâneas uma vez que se esperavam efeitos das ondas, nomeadamente espraio e alturas de onda, poucos significativos na praia estuarina do Alfeite.

O processo de orientação externa da câmara, quando considerando a totalidade dos pontos de controlo levantados, apresentou um erro muito elevado de 4.7 m, tendo sido reduzido para 0.98 m quando se eliminaram alguns pontos que apresentavam maior erro. O elevado erro obtido no processo de orientação externa poderá dever-se ao ponto escolhido para referência de campo, como sendo o topo/centro da antena GPS, que eventualmente poderá ter sido mal localizado em algumas imagens, particularmente quando este se encontrava a distâncias mais afastadas da câmara. Contrariamente ao que seria de esperar, devido às maiores distâncias envolvidas, o erro obtido na Lagoa de Albufeira foi bastante menor, 0.5 m, (Capítulo 3.2.1) do que o obtido na praia do Alfeite, provavelmente devido à imprecisão na localização dos CGP nas imagens rectificadas. A convergência para a solução mais provável, foi atingida em 4 iterações utilizando as coordenadas da câmara levantadas com a estação total como estimativa inicial do processo de orientação da câmara.

Os níveis de maré foram medidos com um transdutor de pressão colocado nas proximidades da câmara, sendo que o nível utilizado para cada imagem rectificada (10 em 10 minutos) foi aproximado tendo em conta os efeitos das ondas (Figura IV.16). Este procedimento é segundo Smith & Bryan (2007) o procedimento mais preciso uma vez que dispensa a utilização de complexos modelos de previsão para os níveis de maré e desta forma minimiza as fontes de erro.

A digitalização analógica em ArcGis do limite água/terra foi escolhida em detrimento da digitalização automática, essencialmente, por constrangimentos temporais uma vez que o desenvolvimento de um sistema de classificação e digitalização automática implicaria o desenvolvimento, teste e calibração de algoritmos para a classificação das imagens que recaem fora do âmbito do presente trabalho. Para além das questões temporais a digitalização manual em ambiente ArcGis apresenta a vantagem de ser supervisionada permitindo minimizar os efeitos mais significativos do espraio das ondas, bem como a possibilidade de ser efectuada a diferentes escalas consoante a nitidez da imagem.

Como resultado final da aplicação prática, foi gerado um modelo digital de terreno a partir das linhas de contorno digitalizadas em ArcGis. A análise do erro quadrático médio vertical (rms) entre os resultados obtidos pela digitalização nas imagens rectificadas e pelos levantamentos topográficos, revelou resultados muito favoráveis com um rms médio para a totalidade dos perfis levantados de 0.08 m. O máximo erro obtido foi a uma distância de 390 m da câmara, com diferenças altimétricas na ordem dos 0.15 m (0.147 m). Como seria espectável, de um modo geral, o rms aumenta com a distância à câmara (Figura IV.29 e IV.30), sendo que até distâncias inferiores a 250 m da posição da câmara os erros são maioritariamente inferiores a 0.10 m, com excepção do perfil correspondente à distância 170 m da câmara (Figura IV.23 direita) que apresenta um rms de 0.11 m (0.107 m), em que o erro poderá dever-se aos reduzidos pontos topográficos levantados no perfil transversal. Semelhantes resultados foram obtidos por Aarninkhof et al. (2003), com os maiores desvios verticais localizados a maiores distâncias e com magnitudes inferiores a 15 cm ao longo de cerca de 85 % dos 2 km de praia estudados. Plant & Holman (1997) reportam no seu trabalho erros

quadráticos médios verticais de 0.24 m, os quais foram reduzidos para 0.06 m pela aplicação de correcções empíricas para o espraio e alturas de ondas na definição dos níveis de maré.

A projecção da dimensão do pixel segundo as direcções do sistema de coordenadas terreno utilizado (Figura IV.31), definida segundo as equações III.14 e III.15 (Capítulo 3), mostra uma importante deterioração da resolução do pixel segundo a componente longitudinal (Δr) à medida que nos afastamos da posição da câmara, por exemplo a distâncias na ordem dos 500 m a dimensão espacial do pixel é na ordem do 20 m (componente longitudinal), esta componente é a principal responsável pela perda de resolução com a distância, essencialmente devido à sua degradação em função do quadrado da distância (R^2) (Equação III.13), sendo que o melhor procedimento para melhorar a resolução longitudinal incide no maximizar a altitude da câmara (Holman & Stanley, 2007).

Por outro lado a componente transversal (Δc) é menos degradada com o afastamento à posição da câmara, variando pouco segundo a direcção transversal (E-W), geralmente com uma dimensão espacial (componente transversal) do pixel inferior a 1 m ao longo do eixo dos x. Esta característica da dimensão espacial do pixel segundo a componente transversal torna-se particularmente importante em estudos da variação da linha de costa, por ser a direcção monitorizada neste tipo de estudo reduzindo a incerteza associada a localização de elementos transversais ao sistema de coordenadas utilizado.

No presente trabalho o sistema de coordenadas adoptado, foi o sistema *Hayford Gauss Datum* Lisboa (Figura IV.13), no qual a posição da linha de costa não corresponde exactamente às direcções do sistema utilizado aumentando a incerteza, sob a forma de dimensão do pixel, na localização da posição da linha de costa, em particular a distâncias da câmara superiores a cerca de 250 m. No presente trabalho, este aspecto não foi inicialmente considerado e como tal parte do erro quadrático médio, a maiores distâncias, deverá estar associado à elevada dimensão espacial do pixel segundo a componente transversal.

A utilização de um sistema de coordenadas adaptado às características de terreno, torna-se desta forma essencial na minimização das fontes de erro e incertezas em estudos baseados em imagem, sendo recomendável a utilização de um sistema de coordenadas paralelo à linha de costa.

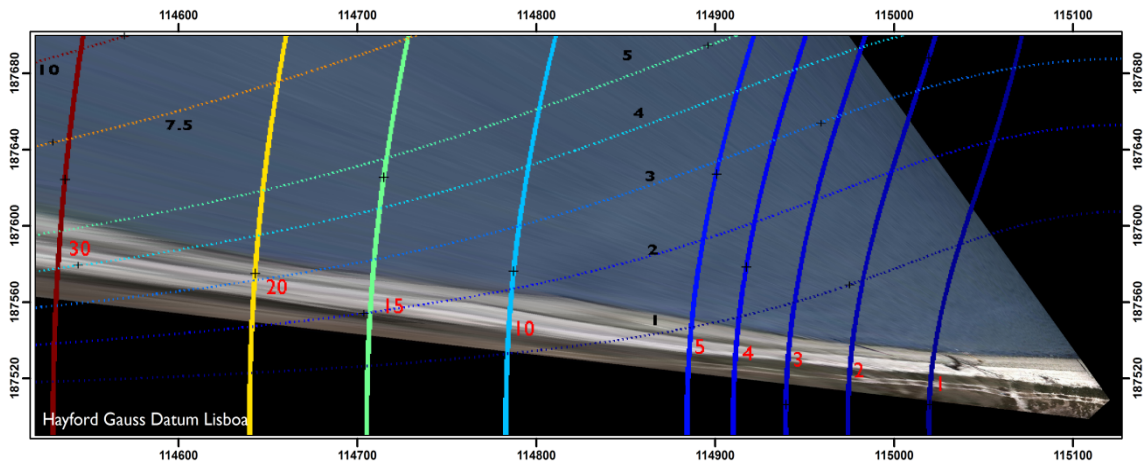


Figura IV. 31 – Dimensão espacial do pixel segundo as direcções adoptadas no sistema de coordenadas terreno. As isolinhas a cheio representam a dimensão espacial do pixel segundo a componente longitudinal (Δy) e as isolinhas a tracejado representam a dimensão espacial do pixel segundo a componente transversal (Δx) relativamente ao sistema de coordenadas terreno.

A utilização de câmaras de vídeo não métricas revelou resultados muito satisfatórios, confirmando a sua aplicabilidade em estudos de sistemas costeiros, e em particular na identificação da posição da linha de costa e caracterização topo-batimétrica da zona entre marés constituindo, desta forma, uma ferramenta acessível de baixo custo que permite a análise dos processos actuantes sobre o litoral a escalas espaciais/temporais bastante vastas. De tal modo que, Chandler et al. (2005) no seu trabalho obteve resultados mais precisos com câmaras não métricas, devidamente calibradas e considerando os efeitos de distorção das lentes, do que com uma câmara métrica, demonstrando desta forma as vantagens significativas na utilização de câmaras comuns caracterizadas por sensores (CCD) de pequenas dimensões que por sua vez simplificam a modelação dos efeitos de distorção das lentes.

5 Conclusões e Considerações finais

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de vídeo-monitorização, baseado em câmaras não métricas e nos fundamentos de fotogrametria terrestre, para aplicação ao estudo da morfodinâmica de praias. No desenvolvimento deste sistema optou-se por utilizar câmaras de videovigilância digitais uma vez que este tipo de câmaras alia a robustez física, ao baixo custo e às excelentes ferramentas de aquisição e transferência de dados. Por exemplo, a capacidade de transferência de imagens remotamente através de Ethernet ou RDIS torna-se uma vantagem competitiva importante na medida em que permite a aquisição de dados sem necessitar de um computador permanente no local de aquisição. No entanto, uma vez que este tipo de câmaras apresenta características não métricas, a respectiva calibração em laboratório revelou-se um passo fundamental para um correcto estabelecimento das relações entre a imagem e o terreno, corrigindo os desvios geométricos induzidos pelas lentes. Os resultados obtidos no âmbito deste trabalho permitiram concluir que, se este procedimento for correctamente efectuado, as imagens corrigidas apresentam distorções praticamente negligenciáveis e são comparáveis às obtidas através da utilização de dispendiosas câmaras métricas. Este procedimento, apesar de relativamente complexo e moroso, só tem de ser realizado uma vez dada a invariabilidade dos parâmetros intrínsecos das câmaras.

Uma vez corrigida a distorção induzida pelas lentes, a criação de imagens rectificadas, sobre a qual se podem efectuar medições e/ou localizações geográficas sobre qualquer elemento morfológico da praia, depende do conhecimento da orientação e posição da câmara relativamente ao terreno (parâmetros extrínsecos). Esta orientação foi determinada a partir das relações geométricas entre as coordenadas dos pontos de controlo levantados no terreno e as respectivas coordenadas na imagem.

O software desenvolvido no âmbito desta dissertação integrou os procedimentos relacionados com a correcção das imagens e com as transformações associadas à respectiva (orto)rectificação. A programação baseou-se em linguagens de programação de alto nível (Matlab, C#) que facilitaram a implementação dos algoritmos numéricos. Nas operações computacionalmente mais exigentes, procuraram-se soluções que optimizassem o tempo de processamento, como foi o caso da utilização da transformação inversa na resolução das transformações relacionadas com a implementação dos modelos de distorção e rectificação.

A aplicação do sistema desenvolvido à Praia do Alfeite, onde se efectuou um levantamento topo-batimétrico da zona intertidal, forneceu resultados muito satisfatórios (o erro quadrático médio vertical obtido foi muito reduzido face às condições de elevada obliquidade da câmara e extensão de praia levantada) demonstrando a aplicabilidade deste sistema a estudos da morfodinâmica de praias. A operacionalidade e portabilidade deste sistema, permite a fácil

implementação em qualquer sistema costeiro, possibilitando a aquisição de informação em condições meteorológicas adversas bem como a escalas espaciais/temporais muito vastas e adaptadas à quantificação de vários processos costeiros para uma melhor compreensão e previsão da evolução do sistema litoral.

No entanto, apesar do sucesso alcançado no decurso deste trabalho, o sistema desenvolvido ainda só se pode considerar um embrião de um Sistema de Vídeo-Monitorização do Litoral verdadeiramente autónomo e que possa ser utilizado directamente pela comunidade científica e pelas entidades gestoras do litoral. Para alcançar este objectivo será necessário automatizar os métodos de aquisição e processamento de imagem de modo a obter informação útil sobre a praia, não só tendo em vista a sua caracterização morfológica (p. ex. localização da linha de costa, barras submarinas) mas também que permita fornecer elementos sobre o respectivo forçamento hidrodinâmico (p. ex. zona de rebentação, espalho e espraio, localização de agueiros) e ocupação (p. ex. capacidade de carga da praia). O desenvolvimento deste sistema constituirá um importante contributo para a implementação de políticas de gestão integrada da faixa costeira.

6 Referências

Aarninkhof, S.G.J. (2003) – *Nearshore bathymetry derived from video imagery*. Ph.D. Dissertation. Technical University of Delft, Delft 2003, 175 pp.

Aarninkhof, S.G.J.; Turne, I.L.; Dronkers, T.D.T.; Caljouw, M.; Nipius, L. (2003) - *A video-based technique for mapping intertidal beach bathymetry*. Coastal engineering, Vol. 49, 2003, 275-289.

Aarninkhof, S.G.J.; Ruessink, B.G. (2004) – *Video Observations and Model Predictions of Depth-Induced Wave Dissipation*. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, Vol. 42, N° 11, November 2004, 2612-2622.

Adams, P.N.; Ruggiero, P.; Schoch, G.C.; Gelfenbaum, G. (2007) – *Intertidal sand body migration along a megatidal coast, Kachemak Bay, Alaska*. Journal of Geophysical Research, Vol. 112, F02007, doi:10.1029/2006JF000487, 19 pp.

Alexander, P.S.; Holman, R.A. (2004) – *Quantification of nearshore morphology based on video imaging*. Marine Geology, Vol. 208, 2004, 101-111.

Alport, M.; Mocke, G.; Govender, K.; Marais, A. (1998) – *The Measurement of Nearshore Processes in the Laboratory and the Field Using Video Imagery*. IEEE, Ocean'98 Conference Proceedings, Vol. 3, 1998, 1744-1748.

Armaroli, C.; Ciavola, P.; Balouin, Y.; Gatti, M. (2004) – *An integrated study of shoreline variability using GIS and ARGUS techniques*. Journal of Coastal Research, SI 39, ICS 2004 Proceedings, 6 pp.

Basu, A. (1995) – *Active calibration of cameras: Theory and Implementation*. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, Vol.25, N° 2, February, 1995, 256-265.

Benetazzo, A. (2006) – *Measurements of short water waves using stereo matched image sequences*. Coastal Engineering, Vol. 53, 2006, 1013-1032.

Berberan, A. (2003) - *Elementos de fotogrametria aplicada à aquisição de informação geográfica*. ISBN 972-95873-5-3, Março 2003, 216 pp.

Brito, J.; Coelho, L. (2002) – *Fotogrametria Digital*. Instituto Militar de Engenharia. 1ª Ed. Rio de Janeiro, Brasil, 2002, Disponível em <http://www.igeo.ufrj.br/gruporetis/sig/tiki-read_article.php?articleId=17> Acedido em: 16Fev2007.

Browne, M.; Blumenstein, M.; Tomlinson, R.; Strauss, D. (2005) – *An intelligent system for remote monitoring and prediction of beach safety*. Proceedings of International Conference on Artificial Intelligence and applications, 2005, 6 pp.

Chandler, J.H.; Fryer, J.G.; Jack, A. (2005) - *Metric capabilities of low-cost digital cameras for close range surface measurement*. The Photogrammetric Record, 20(109), March, 2005, 12-26.

Ciavola, P.; Billi, P.; Armaroli, C.; Balouin, Y.; Preciso, E.; Salemi, E. (2005) – *Morphodynamics of the Bevano Stream outlet: the role of bedload yield*. Geologia Tecnica e Ambientale, 1/2005, 41-57.

Clarke, T.A.; Wang, X. (1998) – *Extracting high precision information from CCD images*. Proceedings of Optical methods for heat and fluid flows, City University. 11 pp.

Coastalwatch (2007) - www.coastalwatch.com , acedido 2 Novembro 2007.

Coelho, M.C.F.S.P; Tavares, J.M.R.S. (2003) – *Toolbox de Calibração de Câmaras para Matlab*. Relatório Interno, Laboratório de Óptica e Mecânica e Experimental, Outubro, 2003, 15 pp.

Cohen, A. (2003) – *Video-derived Observation of Longshore Currents*. M. Sc. Dissertation, Technical University of Delft, Delft 2003, 98 pp.

Conley, D.C.; Trangeled, A.; Zappa, G.; Gualdesi, L.; Guerrini, P.; Holman, R.A. (2007) – *Rapid environmental assessment in the nearshore*. Journal of Marine Systems In Press, corrected Proof, available online 1 March 2007, 12 pp.

Curtis, W.C.; Hathaway, K.K.; Hollnad, K.T.; Seabergh, W.C. (2002) – *Video-Based Wave Direction Measurements in a Scale Physical Model*. US Army Corps of engineers, ERDC/CHL CHETN-IV-49, September 2002, 10 pp.

Davidson, M.; Koningsveld, M.V.; Kruif, A.; Rawson, J.; Holman, R.; Lamberti, A.; Medina, R.; Kroon, A.; Aarninkhof, S. (2007) – *The CoastView project: Developing video-derived Coastal State Indicators in support of coastal zone management*. Coastal Engineering, Vol. 54, Issues 6-7, June-July 2007, 463-475.

Doucette, J.S.; Harvey, E.S.; Shortis, M.R. (2002) – *Stereo-video observation of neashore bedforms on a low energy beach*. Marine Geology, Vol. 189, 289-305.

Dronkers, T. (2001) - *Intertidal morphodynamics at Narrowneck Reef*. M.Sc. Dissertation. Technical University of Delft, Delft 2001, 55 pp.

Fachin, S.; Sancho, F.; Ortega, M.; Losada, M. (2005) – *Sistema de vídeo-monitorização da morfodinâmica costeira: Praia de Trafalgar*. 4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005, 17 pp.

Foote, M.; Horn, D. (1999) – *Video measurement of swash zone hydrodynamics*. *Geomorphology*, Vol. 29, 1999, 59-76.

Foote, M.; Horn, D.; Li, L. (2002) – *Measuring swash zone hydrodynamics and morphodynamic change – a high-resolution laboratory system using digital video*. *Journal of Coastal Research*, SI 36, ICS 2002 Proceedings, 300-316.

Freire, P. (2003) – *Morphological and sedimentary evolution of estuarine banks (Tagus Estuary, Portugal)*. Ph.D. Dissertation, University of Lisbon, LNEC, TPI 28 (in Portuguese).

Haxel, J.H.; Holman, R.A. (2004) – *The sediment response of a dissipative beach to variations in wave climate*. *Marine Geology*, Vol. 206, 2004, 73-99.

Heikkila, J.; Silvén, O. (1997) – *A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction*. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97), San Juan, Puerto Rico, 1997, 1106-1112.

Heikkila, J. (2000) – *Geometric camera calibration using circular control points*. , IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.22, N° 10, Oct 2000, 1066-1077.

Holland, K.T.; Holman, R.A. (1996) – *Field observations of beach cusps and swash motions*. *Marine Geology*, Vol. 134, 1996, 77-93.

Holland, K.T.; Holman, R.A.; Lippmann, T.C. (1997) – *Practical Use of Video Imagery in Nearshore Oceanographic Field Studies*. IEEE Journal of oceanic Engineering, Vol. 22, N°1, January 1997, 81-92.

Holland, K.T. (1998) - *Beach cusp formation and spacings at Duck, USA*. *Continental Shelf Research*, Vol. 18, 1998, 1081-1098.

Holland, K.T.; Puleo, J.A.; Kooney, T.N. (2001) – *Quantification of swash flows using video-based particle image velocimetry*. *Coastal Engineering*, Vol. 44, 2001, 65-77.

Holman, R.A.; Sallenger, J.; Lippmann, T.C.; Haines, J.W. (1993) - *The Application of Video Image Processing to the Study of Nearshore Processes*. *Oceanography*, Vol. 6, N° 3, 1993, 78-95.

Holman, R. (2005) – *Optical Imaging of the Nearshore*. *Coastal geosciences: Annual Reports*, Office of Naval Research, 2005, 6 pp.

Holman, R.A.; Stanley, J. (2007) – *The history and technical capabilities of Argus*. *Coastal Engineering* 54, 2007, 477-491.

Instituto Hidrográfico (2007) –

<http://www.hidrografico.pt/wwwbd/Mares/MaresPortosSecundarios.asp> , acedido 2 Novembro 2007.

Konicki, K.M.; Holman, R.A. (2000) – *The statistics and kinematics of transverse sand bars on an open coast*. *Marine Geology*, Vol. 169, 2000, 69-101.

Madsen, A.J.; Plant, N.G. (2001) - *Intertidal beach slope predictions compares to field data*. *Marine Geology*, Vol. 173, 2001, 121-139.

Matlab Central (2007) - <http://blogs.mathworks.com/steve/2006/05/05/spatial-transformations-inverse-mapping/>, acedido 2 Novembro 2007.

Medina, R.; Marino-Tapia, I.; Osorio, A.; Davidson, M.; Martin, F.L. (2007) – *Management of dynamic navigational channels using video techniques*. *Coastal Engineering*, Vol. 54, 2007, 523-537.

Mikhail, E.M.; Bethel, J.S.; McGlone, J.C. (2001) – *Introduction to modern Photogrammetry*. John Wiley and Sons, New York, 2001, 479 pp.

Morris, B.D.; Davidson, M.A.; Huntley, D.A. (2001) – *Measurements of the response of a costal inlet using video monitoring techniques*. *Marine Geology*, Vol.175, 2001, 251-272.

Morris, B.D.; Davidson, M.A.; Huntley, D.A. (2004) – *Estimates of the seasonal morphological evolution of the Barra Nova Inlet using video techniques*. *Continental Shelf Research*, Vol. 24, 2004, 2663-278.

Oliveira, S.C.; Catalão, J.; Ferreira, Ó.; Dias, J.A. (2006) – *Definição do recuo da linha de costa e avaliação de algumas acções de realimentação no sul de Portugal através de técnicas fotogramétricas*. In: ESIG 2006, IX Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica, USIG, Tagus Park, 15-17 Novembro 2006. 16 pp.

Plant, N.G.; Holman, R.A. (1997) - *Intertidal beach profile estimation using video images*. Marine Geology, Vol. 140, 1997, 1-24.

Quartel, S.; Addink, E.A.m Ruessink, B.G. (2006) – *Object-oriented extraction of beach morphology from video images*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 8, Issue 4, 2006, 256-269.

Redondo, J.M.; Rodriguez, A.; Bahia, E.; Falqués, A.; Gracia, V.; Sánchez-Arcilla, A.; Stive, M.J.F. (1994) – *Imagem analysis of surf zone hydrodynamics*. Coastal Dynamics '94, Proceedings of an International Conference on the Role of the Large scale experiments in coastal Research, Universitat Politècnica de Catalunya, 1994, 350-365.

Siegle, E.; Huntley, D.A.; Davidson, A. (2007) - *Coupling video imaging and numerical modeling for the study of inlet morphodynamics*. Marine Geology, Vol. 236, 2007, 143-163.

Silva, A.N; Taborda, R.; Catalão, J. (2007) – *Vídeo-Monitorização do Litoral: Exemplo da aplicação de técnicas fotogramétricas na localização da linha de costa*. I Encontro de Jovens Investigadores em Geologia da Universidade de Lisboa, 23 a 24 Maio de 2007, 4 pp.

Smith, R.K.; Bryan, K.R. (2007) – *Monitoring Beach Face Volume with a Combination of Intermittent Profiling and Video Imagery*. Journal of Coastal Research, Vol. 23, N° 4, 2007, 892-898.

Turner, I.L.; Whyte, D.; Ruessink, B.G.; Ranasinghe, R. (2007) – *Observations of rip spacing, persistence and mobility at a long, straight coastline*. Marine Geology, Vol. 236, 2007, 209-221.

Van Enkevort, I.M.J.; Ruessink, B.G. (2003) – *Video observation of nearshore bar behavior. Part 2: alongshore non-uniform variability*. Continental Shelf Research, Vol. 23, 2003, 513-532.

Van Koningsveld, M.; Davidson, M.; Huntley, D.; Medina, R.; Aarninkhof, S.; Jiménez, J.A.; Ridgewell, J.; Kruijff, A. (2007) – *A critical review of the CoastView project: Recent and future developments in coastal management video systems*. Coastal Engineering, Vol.54, 2007, 567-576.

Van Rijn, L.C. (2007) – *Manual Sediment Transport Measurements*. Delft Hydraulics Laboratory, Chapter 11: Argus Video System, April 2007, 11.1 – 11.14.

Video monitoring (2007) - www.video-monitoring.com , aceso 2 Novembro 2007

Vision Caltech (2007) - www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/#examples , accedido: 2 Novembro 2007.

Vision Caltech (2007b) - www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/htmls/parameters.html , accedido: 2 Novembro 2007

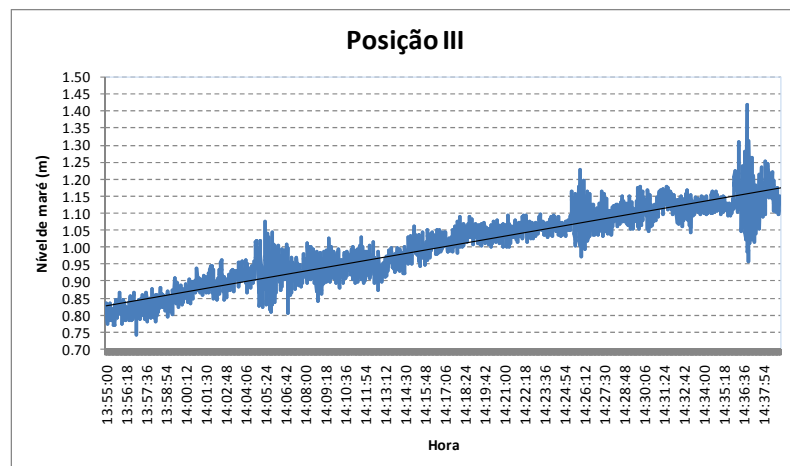
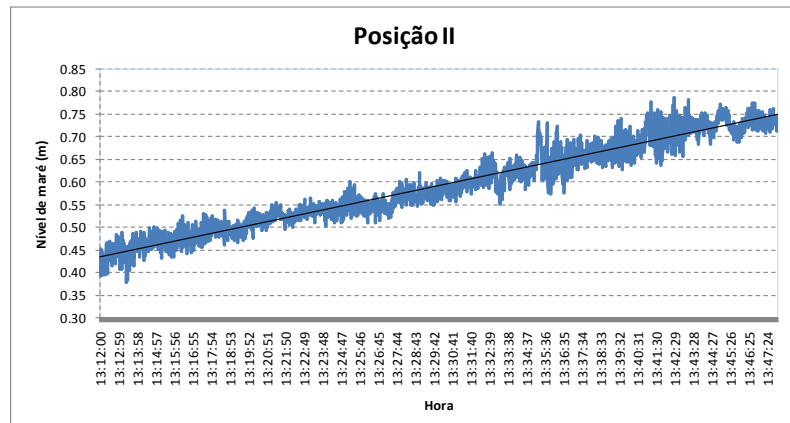
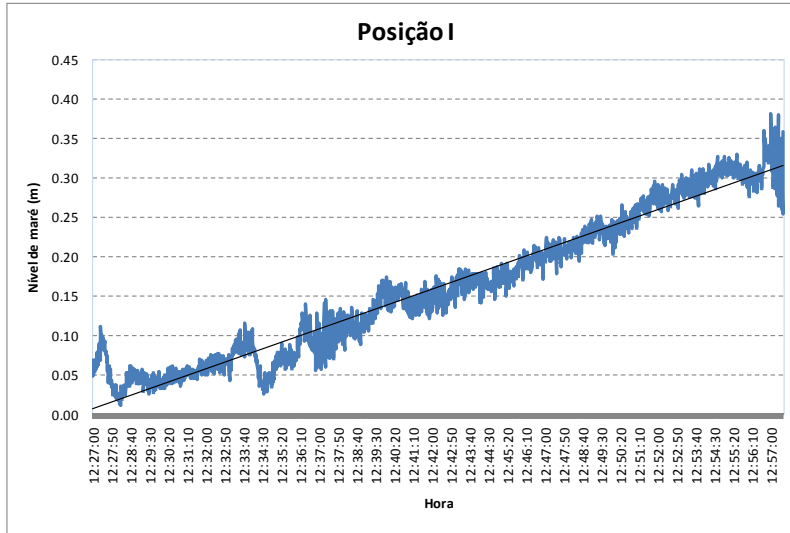
Vision Caltech (2007c) - www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/ , accedido: 2 Novembro 2007.

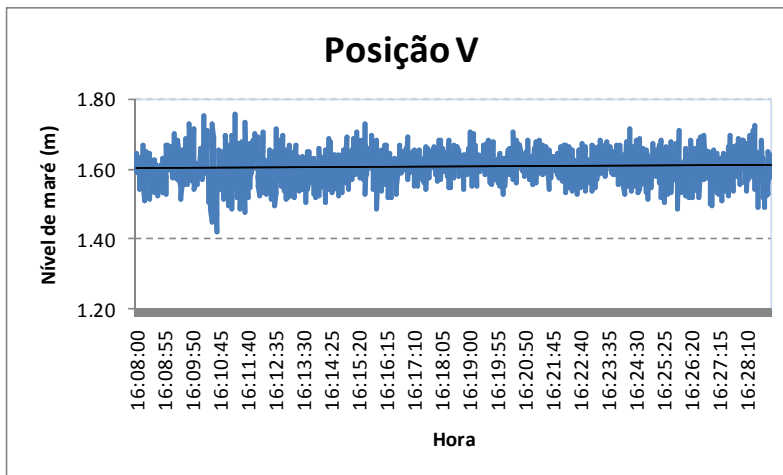
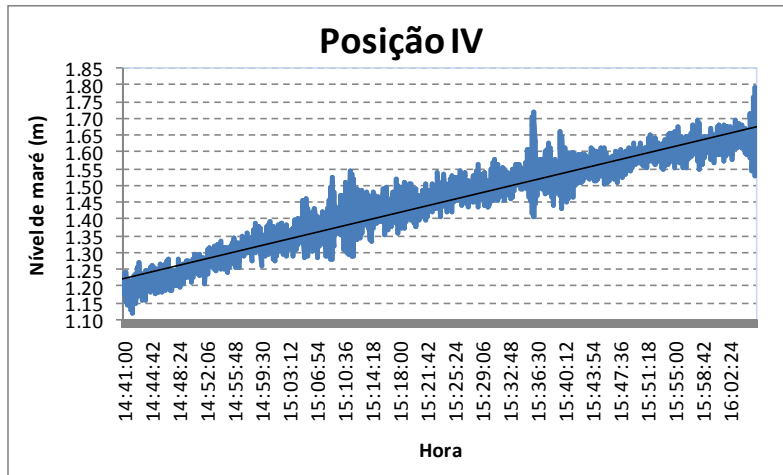
Wang, J.; Cohen, P.; Herniou, M. (1992) – *Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation*. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 14, n°10, October, 1992, 965-980.

Wolf, P.R.; Dewitt, B.A. (2000) – *Elements of photogrammetry: with Applications in GIS*. 3rd ed., USA, McGraw-Hill Book Company, 2000, 607 pp.

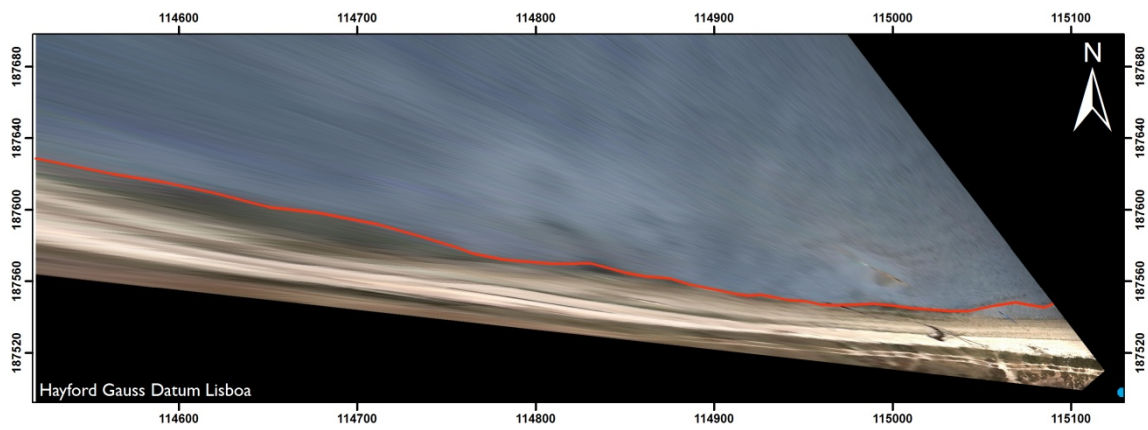
7 Anexos

7.1 Anexo A – Níveis de maré para as diferentes posições do transdutor

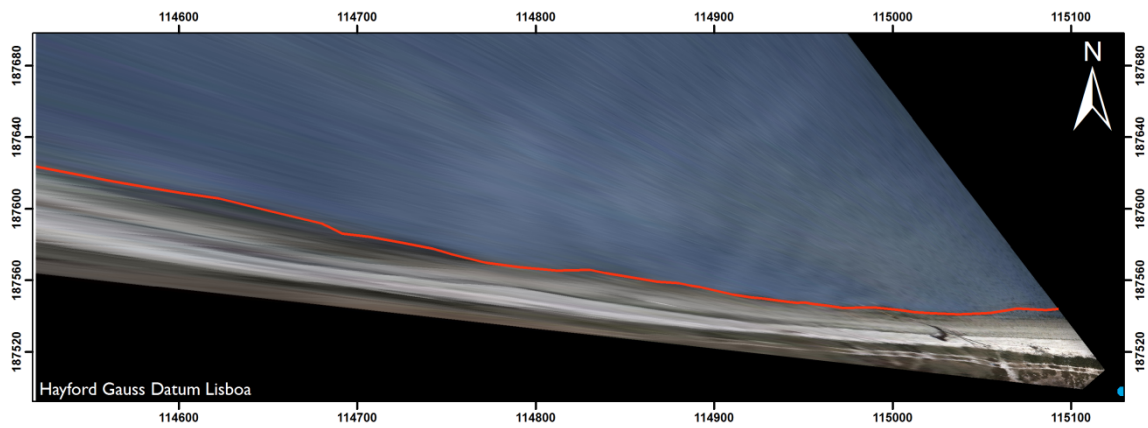




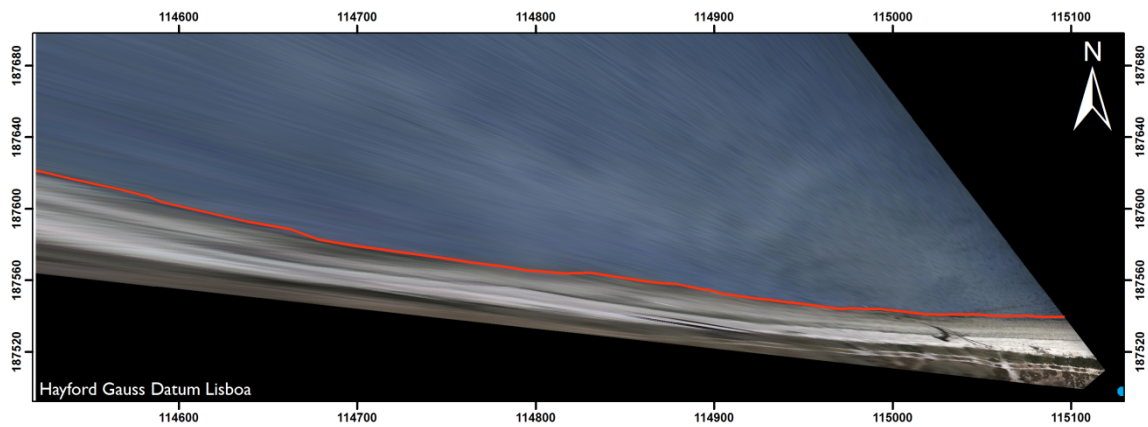
7.2 Anexo B – Imagens rectificadas de 10 em 10 minutos



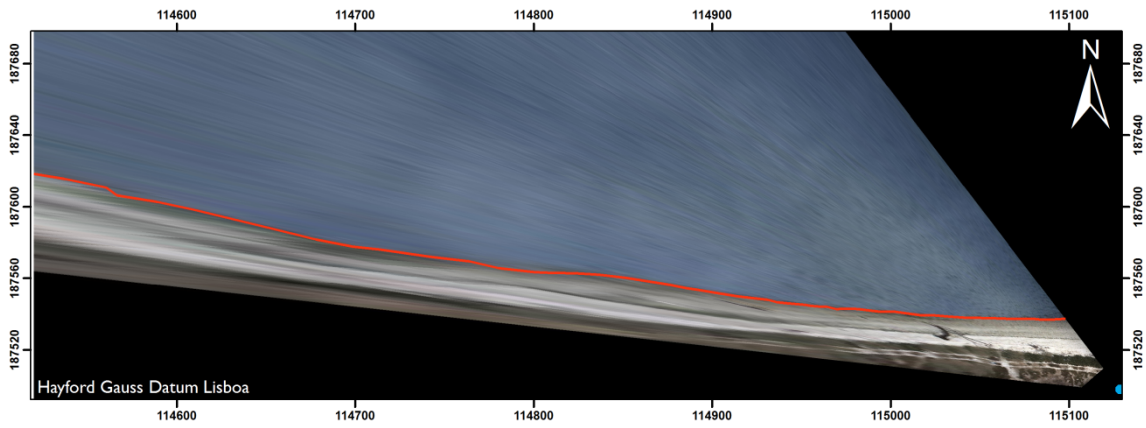
Nível de maré -0.1 m



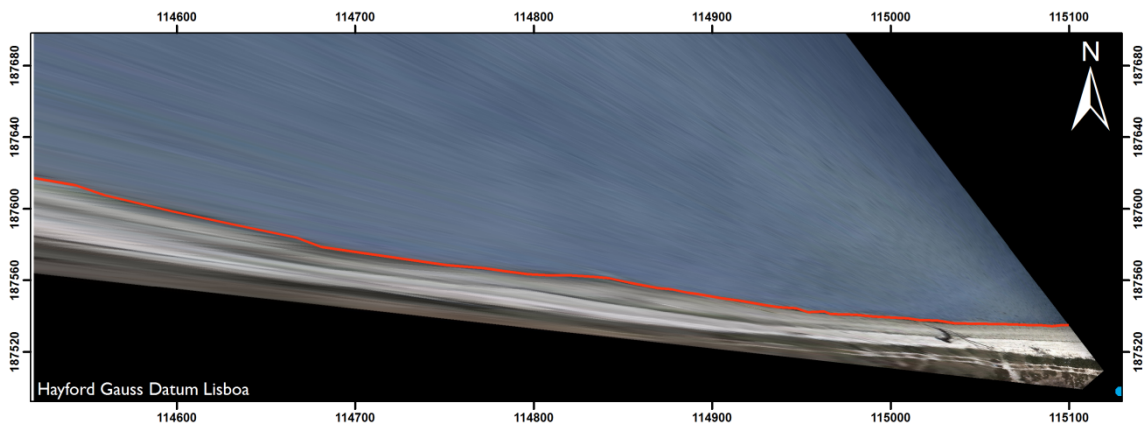
Nível de maré 0 m



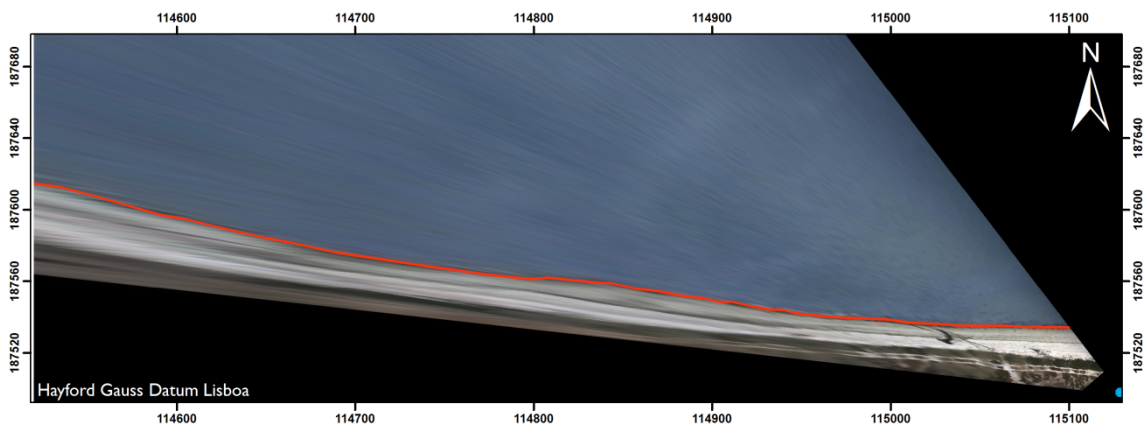
Nível de maré 0.1 m



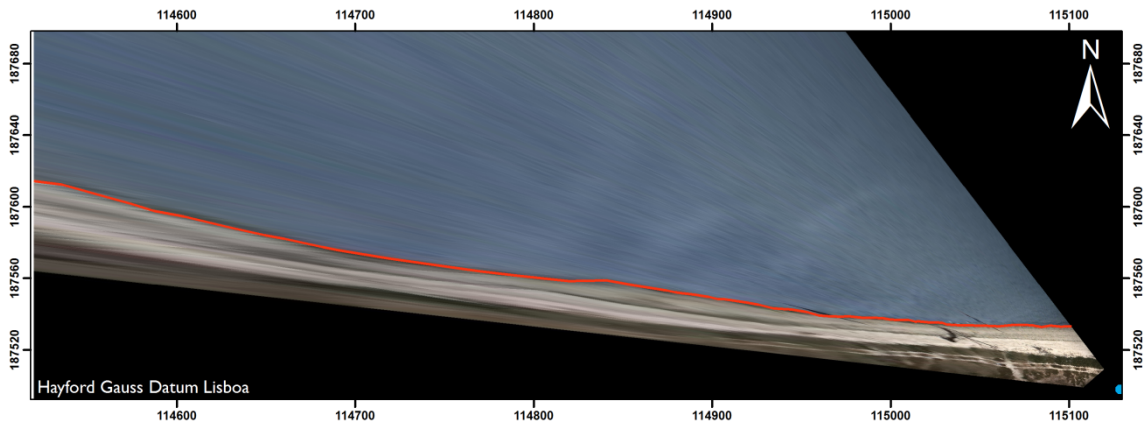
Nível de maré 0.2 m



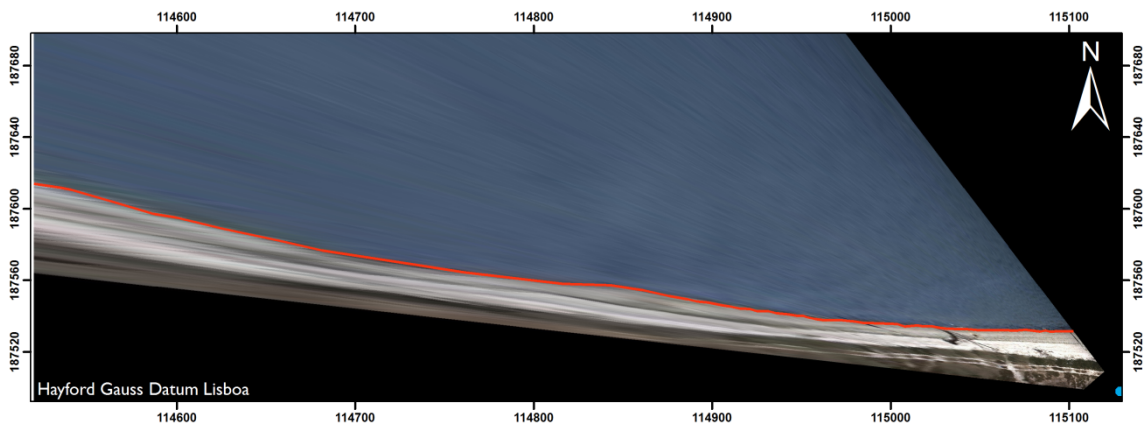
Nível de maré 0.3 m



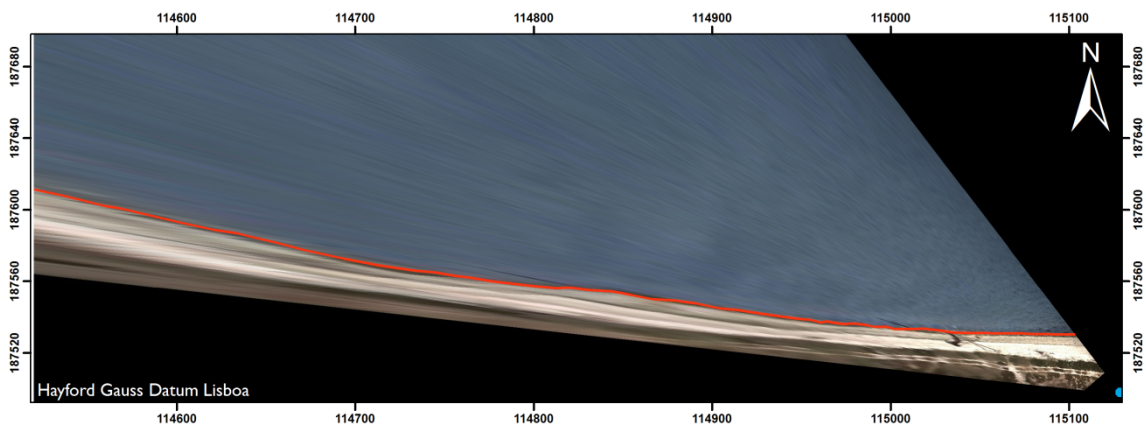
Nível de maré 0.35 m



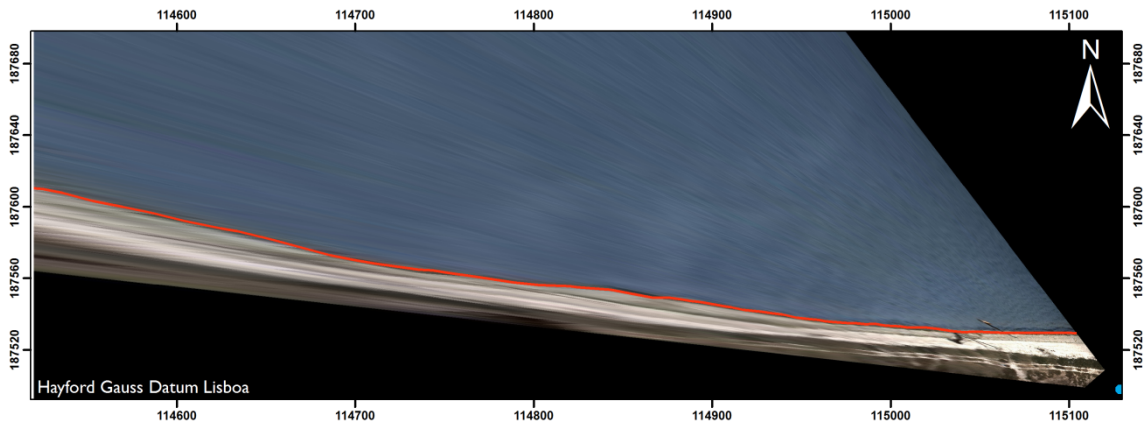
Nível de maré 0.5 m



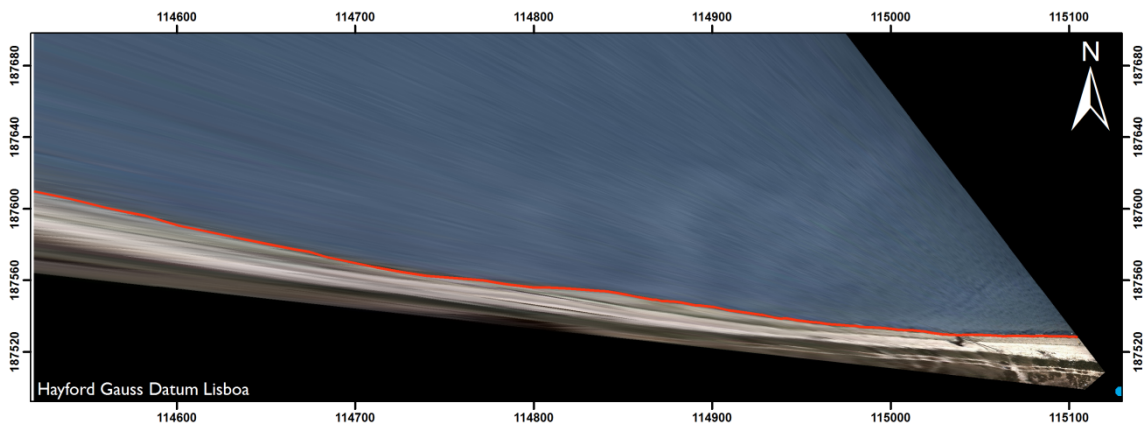
Nível de maré 0.6 m



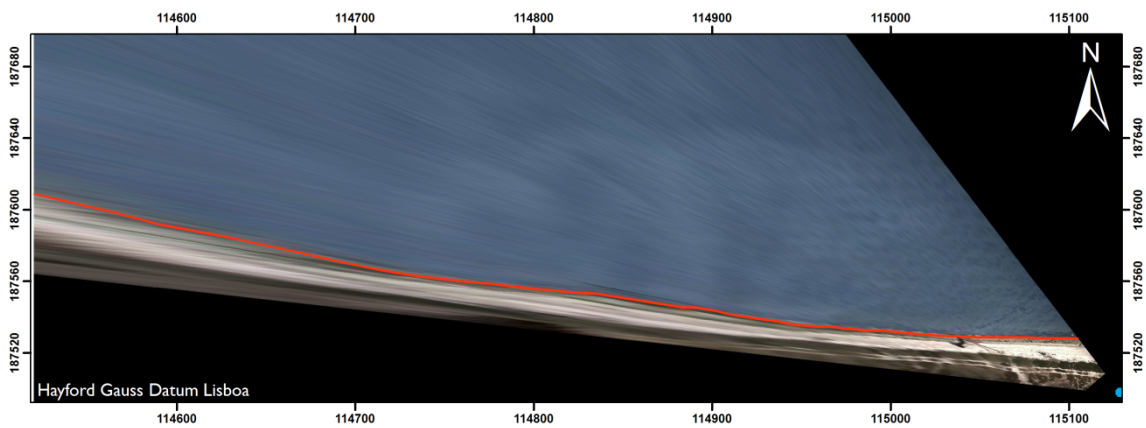
Nível de maré 0.7 m



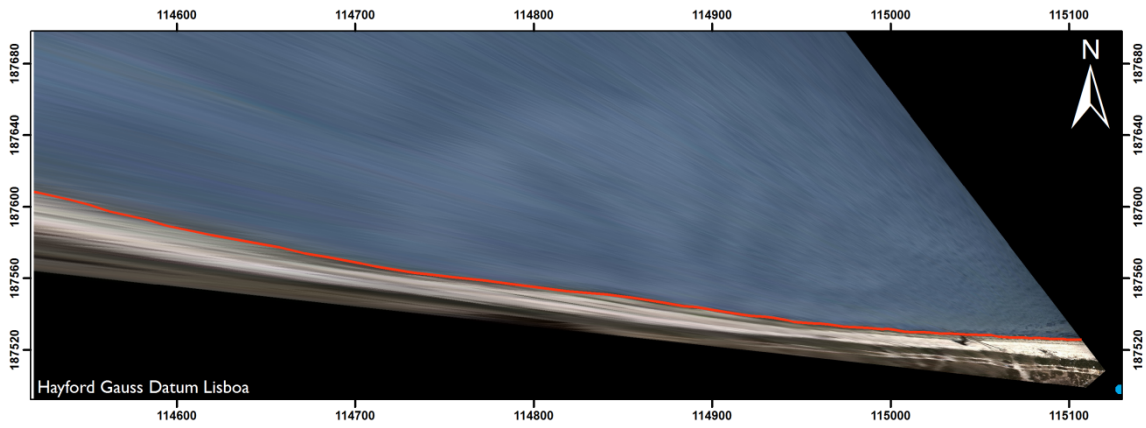
Nível de maré 0.8 m



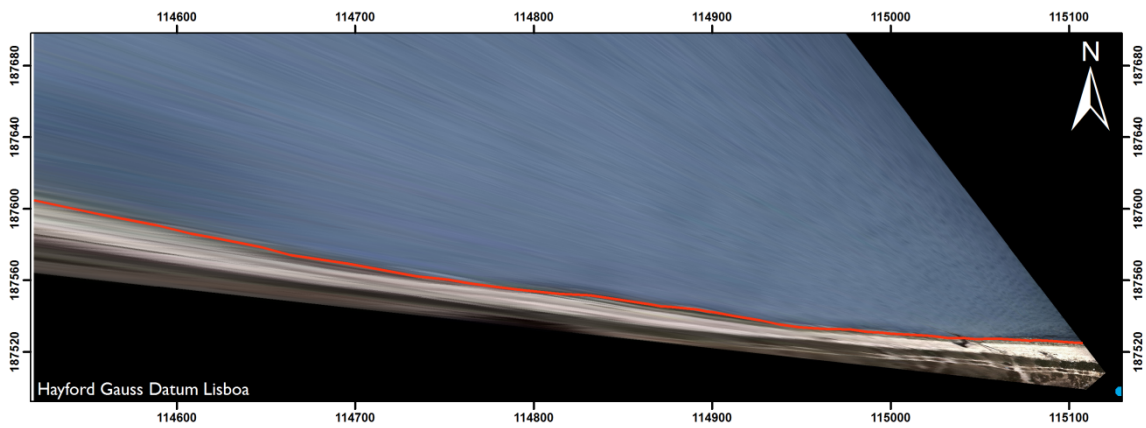
Nível de maré 0.87 m



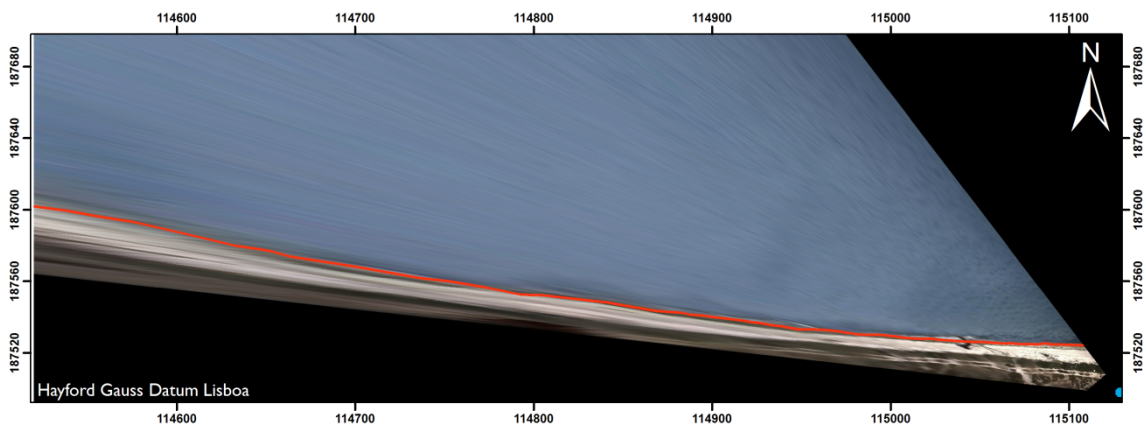
Nível de maré 0.93 m



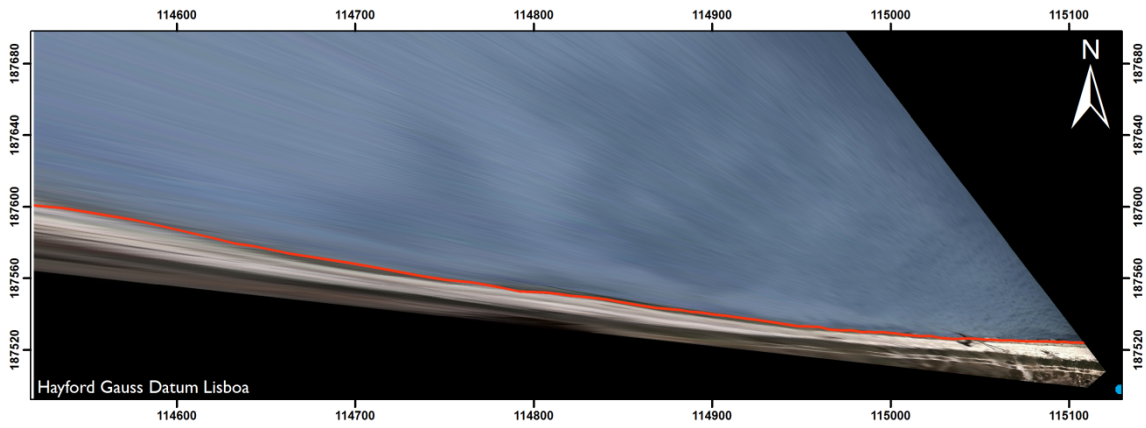
Nível de maré 1.05 m



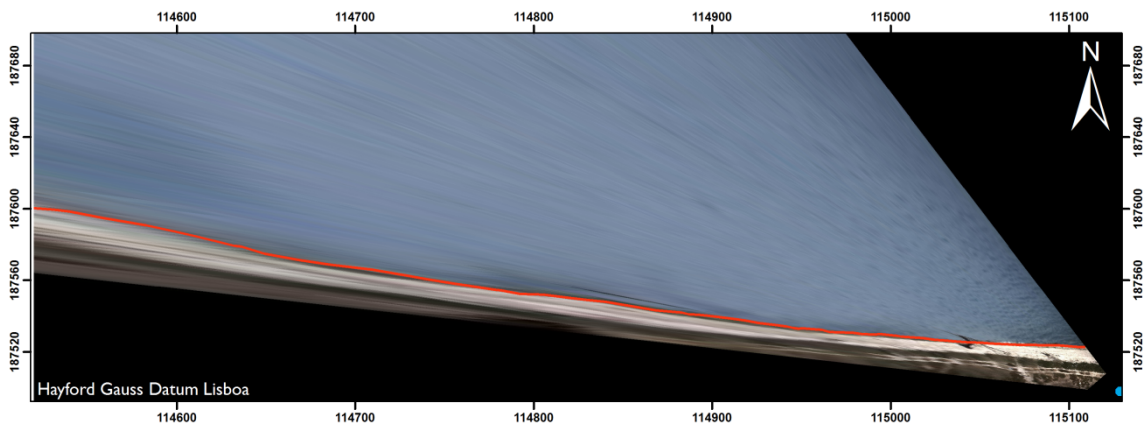
Nível de maré 1.1 m



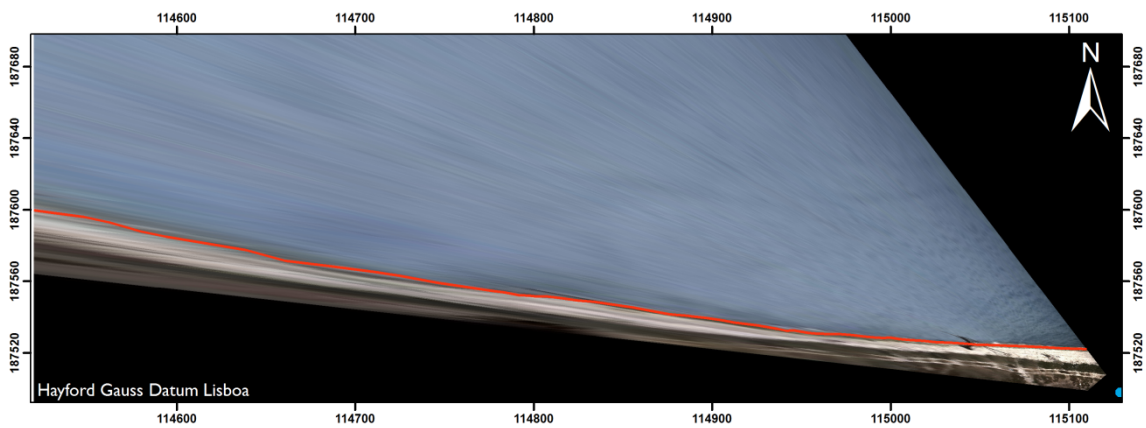
Nível de maré 1.22 m



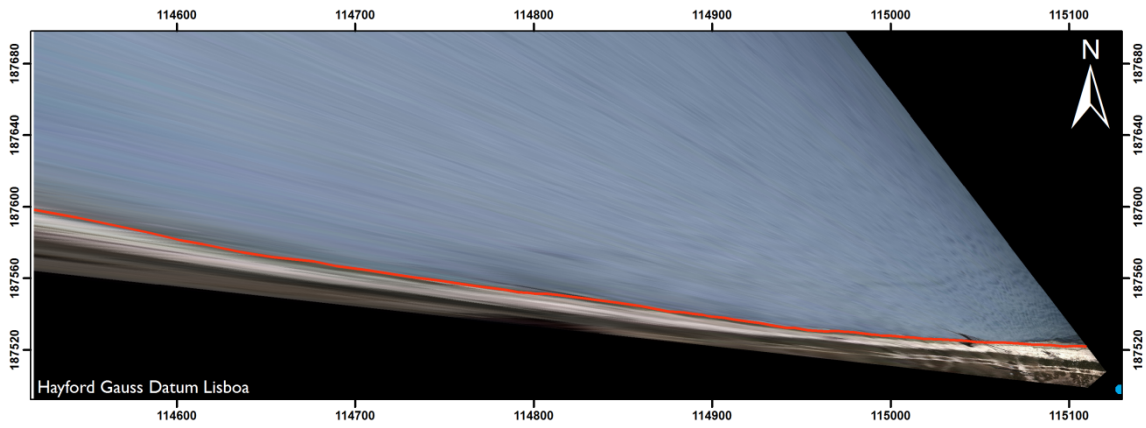
Nível de maré 1.28 m



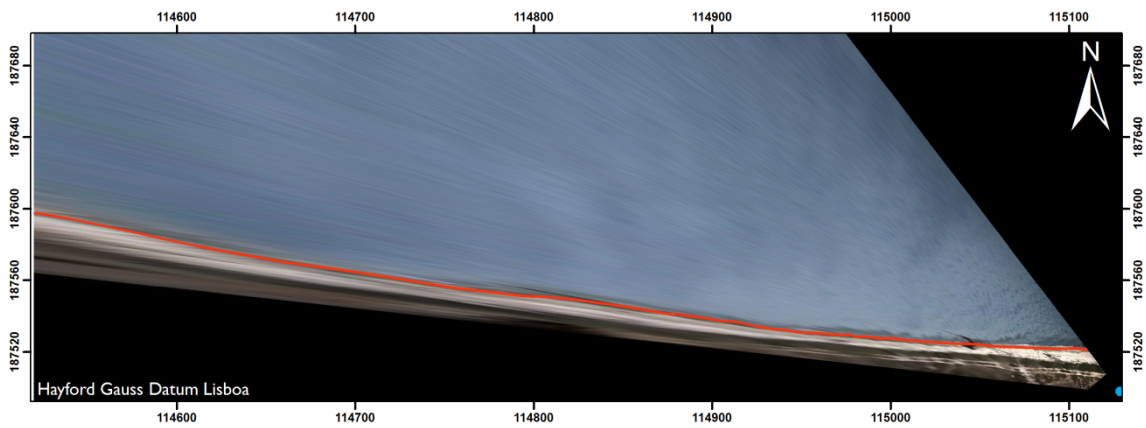
Nível de maré 1.34 m



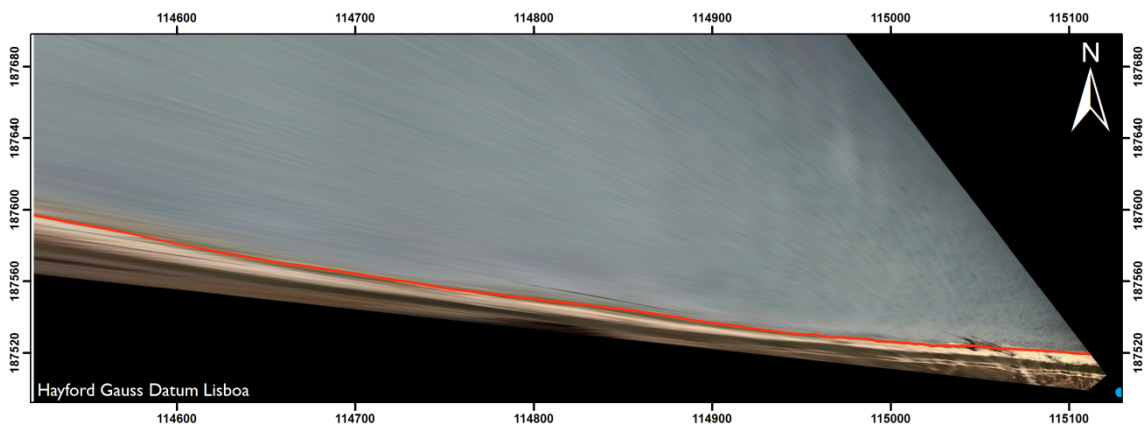
Nível de maré 1.37 m



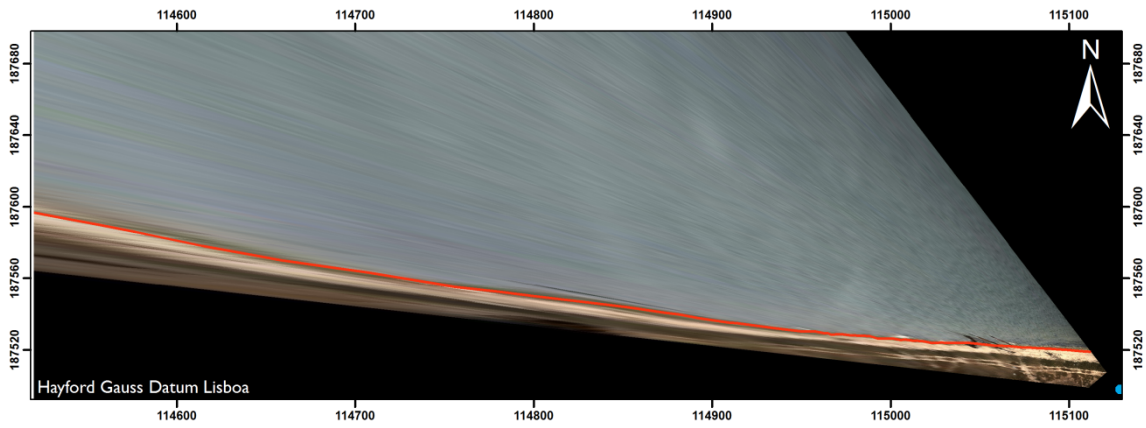
Nível de maré 1.40 m



Nível de maré 1.47 m



Nível de maré 1.55 m



Nível de maré 1.57 m