

Arlete da Silva Rodrigues

**Metodologia de avaliação de fusão de imagens
baseada em imagens sintéticas**



FACULDADE DE CIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Matemática Aplicada
Faculdade de Ciências, Universidade do Porto
Março, 2008

Arlete da Silva Rodrigues

**Metodologia de avaliação de fusão de imagens
baseada em imagens sintéticas**



*Tese submetida à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
para obtenção do grau de Mestre em Detecção Remota*

**Departamento de Matemática Aplicada
Faculdade de Ciências, Universidade do Porto
Março, 2008**

Agradecimentos

Concluído o trabalho, é importante dar uma palavra de apreço a todos aqueles que, directa ou indirectamente, contribuíram para a realização e conclusão desta dissertação.

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores, Prof. André Marçal e Prof. Mário Cunha, pela disponibilidade e cujas orientações permitiram conduzir de forma eficaz a realização do trabalho proposto.

Ao Projecto OASIS (nº307) pela cedência das imagens SPOT, e ao Projecto LameSat_XXI da FCT (PTDC/AGR-AAM/67182/2006) do qual faz parte o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas, que me apoiaram e deram força para prosseguir nos momentos mais difíceis.

À minha colega e amiga Isabel Pôças, pela sua ajuda na identificação dos vários tipos de ocupação de solo e pelo seu apoio ao longo de todo o trabalho.

Ao meu namorado, pelo companheirismo e força, que fez com que tivesse sempre uma atitude positiva face aos problemas que foram surgindo.

Por fim, mas em especial, à minha família cujo apoio e motivação incondicional foram fundamentais no meu crescimento pessoal e profissional.

Resumo

A possibilidade de obter imagens de alta resolução, a partir dos Satélites de Observação da Terra (SOT), levou ao aparecimento de novas técnicas e metodologias de processamento e integração de dados, como é o caso da fusão de imagens. A fusão de imagens foi, e continua a ser, alvo de estudos, os quais têm levado ao desenvolvimento de vários métodos de fusão de imagens e, com eles, várias metodologias de avaliação do processo de fusão.

As metodologias de avaliação do processo de fusão de imagens, permitem avaliar as diferenças/semelhanças existentes entre a imagem fundida e a original. Estas avaliações estão bastante desenvolvidas em termos de pixel a pixel ou banda a banda, no entanto, quando se pretende efectuar estudos comparativos entre conjuntos de pixels, as metodologias referidas não permitem avaliar satisfatoriamente o processo de fusão. Tentando colmatar esta falha, é proposta neste trabalho uma metodologia de avaliação da fusão, efectuando medidas quantitativas para um conjunto de pixels.

A metodologia de avaliação, apresentada ao longo do trabalho, é baseada em imagens sintéticas geradas a partir de uma imagem multiespectral de satélite. Numa primeira fase, é criada uma imagem base simulando diferentes parcelas de terreno com diferentes tamanhos e localizações conhecidas. Em seguida, na imagem de satélite são seleccionadas diferentes parcelas com diferentes tipos de ocupação de solo, que em conjunto com a imagem base geram a imagem sintética multiespectral. A partir desta são criadas duas imagens, uma pancromática e uma multiespectral de baixa resolução. Estas são usadas para gerar uma imagem fundida, usando cada um dos seguintes métodos de fusão: Brovey, IHS, PCA e Wavelet. No final, são criadas imagens NDVI para avaliação do processo de fusão de imagens para um conjunto de pixels, usando duas abordagens distintas: (1) comparação entre NDVI obtido para as imagens multiespectral de alta resolução e fundida, e (2) comparação entre NDVI obtido para as imagens multiespectrais de alta e baixa resolução.

A criação das imagens sintéticas foi desenvolvida usando a linguagem de programação C. Devido ao facto de se pretender divulgar esta metodologia de criação das imagens sintéticas, é criada uma aplicação computacional robusta e de fácil utilização, funcionando como uma interface entre o utilizador e os programas em C. Esta aplicação foi desenvolvida em Visual Studio 2005, usando a linguagem de programação C#.

Abstract

The possibility of getting high resolution images, from the Earth Observing System (EOS), led to the appearance of new techniques and methodologies of processing and data integration, as it is the case of the image fusion. The image fusion was, and still is, a subject of many studies, which have led to the development of some methods of image fusion and, with them, several methodologies for assessing the fusion process.

The methodologies to assess the image fusion process, allow an evaluation of the differences/similarities between the fused and original images. These evaluations are well developed in terms of pixel by pixel or band by band, however, when comparative studies between sets of pixels are needed, the referred methodologies do not allow a satisfactory assessment of the image fusion process. Trying to remedy this flaw, this paper proposes a evaluation method of the fusion process, that uses statistical measurements made on a given set of pixels.

The evaluation method presented throughout the work is based on synthetic images generated from a multi-spectral satellite image. Initially, a base image simulating land parcels with known different sizes and locations is created. Then, different parcels with different land cover types are selected from the satellite image, and together with the base image they create the multi-spectral synthetic image. From it, two images are created, a panchromatic and a multi-spectral of low resolution. These are used to generate a fused image using each one of the following fusion methods: Brovey, IHS, PCA and Wavelet. In the end, NDVI images are calculated in order to evaluate the image fusion process for a set of pixels, using two distinct approaches: (1) comparison between NDVI obtained from the high resolution multi-spectral and fused images, and (2) comparison between NDVI obtained from the high and low resolution multi-spectral images.

The procedure to create synthetic images was developed using the programming language C. In order to divulge this methodology it was developed a robust and easy to use computer application functioning as an interface between the user and the programs in C. This application was developed in Visual Studio 2005, using the programming language C #.

Résumé

La possibilité d'obtenir des images en haute résolution, à partir des SOT, a conduit à l'apparition de nouvelles techniques et méthodologies de traitement et intégration de données, comme c'est le cas de la fusion d'images. La fusion d'images fût, et continue d'être, la cible d'études, qui ont amené au développement de plusieurs méthodes de fusion d'images et, avec elles, plusieurs méthodologies d'évaluation du processus de fusion.

Les méthodologies d'évaluation du processus de fusion d'images, permettent d'évaluer les différences/similitudes existantes entre l'image résultante de la fusion et l'image originale. Ces évaluations sont bien développées en termes de pixel à pixel ou de bande à bande, néanmoins, quand on prétend effectuer des études comparatives entre des ensembles de pixels, les méthodologies d'évaluation mentionnées ne permettent pas d'évaluer de forme satisfaisante le processus de fusion. Pour tenter de colmater cette imperfection, on propose dans ce travail une méthodologie d'évaluation du processus de fusion, en effectuant des mesures quantitatives pour un certain ensemble de pixels.

La méthodologie d'évaluation, présentée au long du travail, est basée sur des images synthétiques produites à partir d'une image multi-spectrale de satellite. Dans une première phase, on crée une image base en simulant différentes parcelles de terrain avec des tailles différentes et des localisations connues. Ensuite, dans l'image de satellite sont sélectionnées différentes parcelles avec différents types d'occupation du sol, qui, avec l'image base, produisent l'image synthétique multi-spectrale. À partir de celle-ci sont créées deux images, une panchromatique et une multi-spectrale de basse résolution. Celles-ci sont utilisées pour générer une image fondue (résultante du processus de fusion), en utilisant chacune des suivantes méthodes de fusion: Brovey, IHS, PCA et Wavelet. Finalement, sont créées des images NDVI pour l'évaluation du processus de fusion d'images pour un ensemble de pixels, en utilisant deux méthodes distinctes : (1) comparaison de NDVI obtenu pour les images multi-spectrales de haute résolution et fondue, et (2) comparaison de NDVI obtenu pour les images multi-spectrales de haute et basse résolution.

La création des images synthétiques a été développée en utilisant le langage de programmation C. Dû au fait qu'on prétende divulguer cette méthodologie de création des images synthétiques, une application informatique robuste et facile d'utilisation a été créée, fonctionnant comme une interface entre l'utilisateur et les programmes dans C. Cette application a été développée à Visual Studio 2005, utilisant le langage de programmation C #.

Índice Geral

Agradecimentos	I
Resumo	II
Abstract	III
Résumé	IV
Índice Geral	V
Lista de Figuras	VIII
Lista de Tabelas	XIII
Acrónimos	XV
1. Introdução	1
2. Fusão de imagens	4
2.1. Métodos de Fusão	5
2.1.1. Brovey	6
2.1.2. IHS	6
2.1.3. PCA	8
2.1.4. Wavelet	9
2.2. Metodologias de avaliação do processo de fusão	11
2.2.1. Avaliação da qualidade espacial da imagem fundida	12
2.2.2. Avaliação da qualidade espectral da imagem fundida	13
2.3. Avaliação da qualidade do processo de fusão na literatura	14

3. Produção de imagens sintéticas	16
3.1. Imagem base	17
3.1.1 Parâmetro c – Número de classes	18
3.1.2 Parâmetro s – Escala	18
3.1.3 Parâmetro u – Tamanho da parcela unitária	19
3.1.4 Parâmetro r – Repetição	19
3.2. Produção de imagens sintéticas multiespectrais	20
3.2.1 Assinaturas espectrais	21
3.2.2 Criar a imagem sintética (MF)	22
3.2.3 Imagens ML e PAN	23
4. Procedimento Experimental	24
4.1. Área de estudo	25
4.2. Imagens satélite	26
4.3. Metodologia de avaliação	29
5. Resultados	34
6. Interface Gráfica	47
6.1. Funcionamento	48
6.2. Imagem Base	51
6.3. Imagem de objectos	55
6.4. Criação da imagem multiespectral (MF)	55
6.4.1 Criar uma nova imagem de referência	56
6.4.2 Seleccionar uma imagem de referência existente	61

6.4.3	Criação da imagem	61
6.5.	Imagens para teste de fusão	63
6.5.1	Criar um novo sensor	64
6.5.2	Seleccionar um sensor existente	67
6.6	Considerações finais	68
7.	Conclusões	69
	Referências	71
	Apêndice	75

Lista de Figuras

Figura 2.1: Métodos de reamostragem: vizinho mais próximo, interpolação bilinear e convolução cúbica.	5
Figura 2.2: Representação do cubo de cor RGB.	6
Figura 2.3: Relação entre os modelos de cor RGB e IHS.	7
Figura 2.4: Representação dos modelos de cor: RGB, IHS hexacônico, IHS cilíndrico e IHS triangular, para um valor constante de I.	7
Figura 2.5: Representação esquemática do processamento do método IHS.	8
Figura 2.6: Pirâmide de múltiplas resoluções.	9
Figura 2.7: Representação esquemática do funcionamento do método Wavelet.	10
Figura 3.1: Imagens base com $c=4$, $c=5$ e $c=6$, todas com $u=4$, $s=4$, $r=2$.	17
Figura 3.2: Imagens base para $c=6$, $c=5$, $c=4$, $c=3$ sendo os restantes parâmetros fixos ($s=7$, $u=3$, $r=3$).	18
Figura 3.3: Imagens base para $s=5$, $s=6$, $s=7$, $s=8$ sendo os restantes parâmetros fixos ($u=3$, $r=3$, $c=6$).	18
Figura 3.4: Imagens base para $u=2$, $u=3$, $u=4$, $u=5$ sendo os restantes parâmetros fixos ($s=7$, $r=3$, $c=6$).	19
Figura 3.5: Imagens base para $r=2$, $r=3$, $r=4$, $r=5$ sendo os restantes parâmetros fixos ($s=7$, $u=3$, $c=6$).	20
Figura 3.6: Imagem multiespectral e identificação de quatro tipos de ocupação de solo.	20
Figura 3.7: Ficheiro de texto de suporte à construção das imagens sintéticas.	21
Figura 3.8: Imagem sintética multiespectral, produzida a partir da imagem de referência da figura 3.6 (com $s=4$, $u=4$, $r=2$, $c=4$).	22
Figura 4.1: Representação esquemática do procedimento experimental adoptado neste estudo.	25
Figura 4.2: Imagem SPOT HRG utilizada (composição RGB 321).	26

Figura 4.3: Imagem Landsat TM utilizada (composição RGB 432).	27
Figura 4.4: Imagem de referência SPOT com 6 classes de ocupação de solo (mata de caducifólias, mata de perenifólias, lameiro de regadio, lameiro de sequeiro, baldios e culturas anuais).	27
Figura 4.5: Imagem de referência Landsat com 6 classes de ocupação de solo (mata de caducifólias, mata de perenifólias, lameiro de regadio, lameiro de sequeiro, baldios e culturas anuais).	28
Figura 4.6: Imagens sintéticas multiespectrais para SPOT e Landsat, após equalização de histograma.	28
Figura 4.7: Imagens sintéticas SPOT banda NIR, banda RED e NDVI.	30
Figura 4.8: Histogramas das imagens apresentadas na figura 4.7: banda NIR, banda RED e NDVI.	31
Figura 4.9: Imagens auxiliares linhas e colunas para cálculo de NDVI médio por parcela, para uma imagem base com $s=8$, $u=3$, $r=5$ e $c=6$.	31
Figura 4.10: Secção do ficheiro de texto com os valores de NDVI por parcela, para as imagens de teste SPOT e Landsat.	32
Figura 5.1: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens SPOT original e fundida pelo método de Brovey.	35
Figura 5.2: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens SPOT original e fundida pelo método IHS hexacónico.	35
Figura 5.3: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens SPOT original e fundida pelo método IHS cilíndrico.	35
Figura 5.4: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens SPOT original e fundida pelo método PCA.	36
Figura 5.5: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens SPOT original e fundida pelo método Wavelet IHS.	36
Figura 5.6: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens SPOT original e fundida pelo método Wavelet banda única.	36

Figura 5.7: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens Landsat original e fundida pelo método de Brovey.	37
Figura 5.8: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens Landsat original e fundida pelo método IHS hexacónico.	37
Figura 5.9: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens Landsat original e fundida pelo método IHS cilíndrico.	38
Figura 5.10: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens Landsat original e fundida pelo método PCA.	38
Figura 5.11: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens Landsat original e fundida pelo método Wavelet IHS.	38
Figura 5.12: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens Landsat original e fundida pelo método Wavelet banda única.	39
Figura 6.1: Painel principal da aplicação desenvolvida, no início de uma nova sessão.	48
Figura 6.2: Apresentação da relação de dependência existente entre as várias etapas.	49
Figura 6.3: Janela de instruções de utilização da aplicação, acessíveis através do botão <i>Help</i> .	49
Figura 6.4: Janela de inicialização de um novo projecto.	50
Figura 6.5: Mensagem de erro caso algum dos campos da janela “New project” não seja preenchido.	50
Figura 6.6: Exemplo de identificação de novo projecto e painel inicial da aplicação após a selecção de um novo projecto.	51
Figura 6.7: Janela de selecção de parâmetros para a imagem base.	52
Figura 6.8: Mensagem de erro se for introduzido um valor inferior a 1 ou superior a 10 para os parâmetros da imagem base.	52
Figura 6.9: Mensagem de erro caso o valor introduzido, para os parâmetros da imagem base, não seja um inteiro.	52

Figura 6.10: Mensagem de erro se algum dos parâmetros da imagem base não estiver preenchido.	52
Figura 6.11: Exemplo de criação de imagem base.	53
Figura 6.12: Exemplo do ficheiro de texto (Info.txt) contendo informação sobre a imagem base gerada.	54
Figura 6.13: Painel principal após a criação da imagem base.	54
Figura 6.14: Painel principal com indicação de que a imagem de objectos foi criada.	55
Figura 6.15: Janela com opções relativas à definição da imagem de referência.	56
Figura 6.16: Janela para indicação de parâmetros relativos à imagem multiespectral de satélite usada como referência.	57
Figura 6.17: Mensagens de erro caso seja introduzido um valor inferior a 1 ou superior a 3, para o número de bandas, ou um valor não inteiro.	57
Figura 6.18: Mensagens de erro caso seja introduzido um valor inferior a 1 ou superior a 2050, para o número de linhas/colunas, ou um valor não inteiro.	58
Figura 6.19: Exemplo da selecção de uma imagem de referência e janela para indicação da localização dos ficheiros para cada banda.	58
Figura 6.20: Mensagem de erro apresentada se a localização de algum ficheiro estiver incorrecta ou vazia.	59
Figura 6.21: Janela para indicação da área de treino da classe 1.	59
Figura 6.22: Mensagens de erro apresentadas se os valores mínimo e máximo forem iguais, se forem inferiores a 1, ou maiores do que o número de linhas/colunas da imagem de referência.	60
Figura 6.23: Exemplo de ficheiro de texto “Reference Satellite Image.txt”, com informação relativa à imagem de referência e classes identificadas.	60
Figura 6.24: Mensagem de erro se o número de classes da imagem de referência escolhida for diferente do número de classes da imagem base.	61

- Figura 6.25:** Exemplo de ficheiro de texto “Info.txt” contendo a informação relativa à criação da imagem sintética multiespectral. **62**
- Figura 6.26:** Painel principal após a criação da imagem sintética multiespectral. **63**
- Figura 6.27:** Janela para selecção do sensor. **63**
- Figura 6.28:** Indicação do “peso” que a banda 1 tem na construção da imagem PAN. **64**
- Figura 6.29:** Mensagem de erro se o valor introduzido não estiver compreendido entre 0 e 1 ou se não for introduzido qualquer valor. **64**
- Figura 6.30:** Pedido do valor para razão entre a alta e baixa resolução espacial do sensor. **65**
- Figura 6.31:** Mensagem de erro se o valor introduzido for inferior a 1, se não for inteiro, ou se não for introduzido nenhum valor. **65**
- Figura 6.32:** Exemplo do ficheiro de texto “Info.txt” após a execução completa. **66**
- Figura 6.33:** Ficheiro de texto “SPOT5HRG2.txt” com os parâmetros do sensor. **67**
- Figura 6.34:** Mensagem de erro se o número de bandas do sensor for diferente do número de bandas da imagem de referência. **67**
- Figura 6.35:** Painel principal com indicação de que as imagens PAN e ML foram criadas. **68**

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Parâmetros de calibração para os satélites SPOT 5 HRG e Landsat 5 TM.	30
Tabela 5.1: Média do erro absoluto em NDVI ($\delta \times 1000$) para as parcelas quadradas e para os seis métodos de fusão, usando a imagem de teste SPOT.	39
Tabela 5.2: Média do erro absoluto em NDVI ($\delta \times 1000$) para as parcelas quadradas e para os seis métodos de fusão, usando a imagem de teste Landsat.	40
Tabela 5.3 Média do erro absoluto em NDVI ($\delta \times 1000$) para as parcelas quadradas, calculada a partir da imagem ML SPOT.	40
Tabela 5.4: Média do erro absoluto em NDVI ($\delta \times 1000$) para as parcelas quadradas, calculada a partir da imagem ML Landsat.	41
Tabela 5.5: Coeficiente de correlação para as parcelas quadradas e para os seis métodos de fusão, usando a imagem de teste SPOT.	41
Tabela 5.6: Coeficiente de correlação para as parcelas quadradas e para os seis métodos de fusão, usando a imagem de teste Landsat.	42
Tabela 5.7: Coeficiente de correlação para as parcelas quadradas, calculado a partir da imagem ML SPOT.	42
Tabela 5.8: Coeficiente de correlação para as parcelas quadradas, calculado a partir da imagem ML Landsat.	42
Tabela 5.9: RMSE para as parcelas quadradas e para os seis métodos de fusão, usando a imagem de teste SPOT.	44
Tabela 5.10: RMSE para as parcelas quadradas e para os seis métodos de fusão, usando a imagem de teste Landsat.	44
Tabela 5.11: RMSE para as parcelas quadradas, calculado a partir da imagem ML SPOT.	44
Tabela 5.12: RMSE para as parcelas quadradas, calculado a partir da imagem ML Landsat.	45

-
- Tabela 5.13:** DE para as parcelas quadradas e para os seis métodos de fusão, usando a imagem de teste SPOT. **45**
- Tabela 5.14:** DE para as parcelas quadradas e para os seis métodos de fusão, usando a imagem de teste Landsat. **46**
- Tabela 5.15:** DE para as parcelas quadradas, calculada a partir da imagem ML SPOT. **46**
- Tabela 5.16:** DE para as parcelas quadradas, calculada a partir da imagem ML Landsat. **46**

Acrónimos

CID – *Canto Inferior Direito*

CSE – *Canto Superior Esquerdo*

DN – *Digital number*

EOS – *Earth Observing System*

HRG – *High Resolution Geometric*

HRV – *High Resolution Visible*

IHS – *Intensity – Hue – Saturation*

MF – *Imagem sintética multiespectral de alta resolução*

ML – *Imagem sintética multiespectral de baixa resolução*

MS – *Imagem multiespectral real*

NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

P – *Imagem pancromática real*

PAN – *Imagem sintética pancromática*

PCA – *Principal Components Analysis*

RADAR – *Radio Detection and Ranging*

SOT – *Satélites de Observação da Terra*

SPOT – *Système Probatoire d’Observation de la Terre*

TM – *Thematic Mapper*

TRMM – *Tropical Rainfall Measuring Mission*

WWW – *World Wide Web*

1.

Introdução

Desde a colocação dos primeiros satélites em órbita, o conhecimento do nosso planeta aumentou consideravelmente ao possibilitar estudos até então limitados ou impossíveis de concretizar. O primeiro satélite a observar a Terra foi o NOAA em 1961, mas actualmente existem em órbita vários satélites com essa função, como o Landsat TM ou o SPOT HRV.

Os Satélites de Observação da Terra (SOT) são usados como fonte de informação, valiosa e fundamental, por diversas áreas como Ambiente, Agricultura, Cartografia, Geologia, Militar, Planeamento Regional e Urbano, entre outras, as quais necessitam de informação geográfica actualizada sobre a superfície da Terra.

A bordo dos satélites, existe uma grande diversidade de sensores responsáveis pela aquisição de imagens, com diferentes características, permitindo o seu uso em várias áreas. A maior parte dos SOT recolhe informação na forma de imagens (por exemplo, IKONOS, SPOT HRV e Landsat TM), contudo alguns, não adquirindo imagens, são usados para recolher uma assinatura espectral bastante precisa dos objectos observados (por exemplo, TRMM e Altímetros RADAR).

Duas características bastante importantes de um sensor são a resolução espacial e a resolução espectral. Por resolução espacial entende-se o menor elemento que um sensor é capaz de distinguir. Ou seja, quanto maior a resolução espacial numa imagem, mais e menores objectos podem ser identificados. A resolução espectral indica as regiões do espectro electromagnético nas quais o sensor é capaz de gerar uma imagem de níveis de cinzento.

As resoluções espectral e espacial apresentam uma relação bastante importante. Os sensores que conseguem obter uma maior resolução espacial têm uma resolução espectral baixa, o que impede a recolha directa de imagens multiespectrais de muito alta resolução.

No entanto, dispondo de uma imagem com alta resolução espacial (pancromática, P) e outra com alta resolução espectral (multiespectral, MS), para um mesmo local, é possível gerar uma imagem multiespectral com alta resolução espacial e espectral. Este processo é denominado por fusão de imagens (*Ranchin & Wald, 2000*).

Para efectuar a fusão de imagens é necessária a execução prévia de dois passos fundamentais. O primeiro é a correcção radiométrica, que permitirá ajustar os níveis radiométricos entre as imagens que se pretende fundir. Deste modo, a variância e média de

intensidades da imagem P são alteradas de forma a igualar o valor correspondente em cada banda espectral da imagem MS. O segundo passo é a correcção geométrica, ou rectificação, o qual permitirá sobrepor as duas imagens.

Num âmbito geral, o processo de fusão combina três níveis de processamento: baixo, médio e alto (*Pohl & Tournon, 1999*). O nível baixo de fusão integra dados de diversas fontes de forma a produzir novos dados, mais sintéticos e consistentes que os originais. O nível médio de fusão combina vários detalhes, agregando os objectos semelhantes e fundindo-os posteriormente. Por último, o nível alto de fusão emprega regras de decisão de forma a reforçar a interpretação e fornecer uma melhor compreensão dos objectos observados. De entre estes níveis, o mais usado na disciplina de Detecção Remota é o nível baixo de fusão, o qual usa um conjunto de imagens (de diferentes resoluções) para gerar uma única imagem que preserve a informação relevante de cada imagem inicial, sem ruído e sem distorções ou inconsistências.

O resultado da fusão é uma imagem multiespectral de alta resolução que proporciona, em norma, uma visualização bastante satisfatória. Esta imagem herda as cores, ou componente multiespectral, da imagem MS, que permitem uma melhor identificação dos objectos representados, preservando os detalhes e pormenores espaciais da imagem P, que permitem distinguir os contornos e limites dos elementos da imagem.

Para assegurar a qualidade da imagem fundida é comum utilizar técnicas estatísticas para uma comparação pixel a pixel, ou banda a banda. Há diversos exemplos na literatura científica onde estes métodos foram aplicados (*Karathanassi et al 2007, Han & Kang 2004 e Hill et al 1999*). No entanto, quando é necessário um estudo comparativo entre conjuntos de pixels ou combinações de bandas, os métodos de avaliação tradicionalmente usados não permitem avaliar a qualidade das imagens obtidas por fusão.

Este trabalho apresenta uma nova metodologia para avaliar o processo de fusão, num conjunto de pixels, usando medidas quantitativas. A metodologia proposta tem como base imagens sintéticas, geradas a partir de assinaturas de uma imagem multiespectral de satélite. Estas imagens sintéticas visam simular parcelas de terreno com diferentes tamanhos e diferentes tipos de ocupação de solo. A avaliação incide sobre os valores de NDVI produzidos a partir das imagens multiespectrais, e não sobre as bandas individuais. O objectivo é verificar se para produzir índices de vegetação é ou não vantajoso usar imagens multiespectrais obtidas por fusão.

De forma a permitir posteriores estudos com este tipo de imagens sintéticas, por parte de eventuais interessados, torna-se também objectivo deste trabalho a criação de uma aplicação

computacional, de fácil utilização, que permita ao utilizador criar as imagens sintéticas pretendidas, de forma rápida e eficaz.

Em suma, os objectivos gerais deste trabalho são: criar uma nova metodologia para testar a fusão de imagens num conjunto de pixels; avaliar a fusão em estudos de produção de índices de vegetação; criar uma aplicação robusta, de fácil utilização e acesso, para possibilitar a criação das imagens sintéticas por qualquer interessado.

2.

Fusão de Imagens

A aquisição de imagens de alta resolução, a partir de SOT, tem vindo a aumentar consideravelmente ao longo dos últimos anos. Muitos dos sensores com capacidade para adquirir imagens de alta resolução espacial produzem imagens de dois tipos: (1) imagem pancromática (P), com a máxima resolução espacial mas apenas com uma banda espectral, e (2) imagem multiespectral (MS) com várias bandas e uma resolução espacial inferior à da imagem P. São exemplos deste tipo de sensores o IKONOS (pancromática com pixel de 1m e multiespectral com 4 bandas e pixel de 4m), o QuickBird (0.6m e 2.4m com 4 bandas) e o SPOT (5m e 10m, ou 10m e 20m, com 4 bandas).

O objectivo da fusão de imagens é a criação de uma imagem multiespectral com altas resoluções espectral e espacial (*Ranchin & Wald, 2000*), agregando toda a informação útil das imagens pancromática e multiespectral.

Actualmente existem vários métodos de fusão de imagens, existindo no entanto algumas limitações para a sua satisfatória utilização. Muitos dos métodos de fusão encontram-se implementados em softwares de processamento de imagem, como por exemplo o PCI Geomatics (*PCI Geomatics, 2005*), o Erdas Imagine (*Leica Geosystems, 2007*) e o Envi (*ITT Corporation, 2007*). Nos métodos mais clássicos, as imagens pancromática e multiespectral têm uma fraca correlação, quer devido à diferença de tempo entre a aquisição das duas imagens, quer devido às diferenças espectrais entre elas. Normalmente, estas diferenças são atenuadas através da alteração dos valores radiométricos, possibilitando efectuar a fusão e obter resultados satisfatórios. Nos métodos de fusão mais recentes, a distorção da informação espectral é muito menor, ou até inexistente, no entanto podem ocorrer distorções a nível espacial (*Li et al, 2005*).

Um dos aspectos importantes a considerar é a avaliação das imagens produzidas por técnicas de fusão. Existem actualmente disponíveis na WWW conjuntos de dados para efectuar e testar os diferentes métodos de fusão: <http://www.engesat.com.br/>, <http://www.spotimage.fr>, e <http://landsat.org/>.

2.1 Métodos de Fusão

Apesar de existirem diversos métodos de fusão de imagens, neste trabalho irão apenas ser usados quatro dos mais clássicos, nomeadamente o método de Brovey, o método IHS (do inglês, Intensity-Hue-Saturation), o método PCA (do inglês, Principal Components Analysis) e o método Wavelet que é o mais recente dos quatro.

A implementação destes métodos de fusão requer inicialmente duas imagens: uma de alta resolução espacial (P) e outra de mais baixa resolução espacial mas com várias bandas espectrais (MS). No entanto, antes de efectuar o processo de fusão é preciso garantir que estas imagens estão georeferenciadas entre si (*Napoleão et al, 2001*).

Para cada um dos métodos de fusão anteriormente referidos é necessário um método de reamostragem associado ao processo de georeferenciação. São três os métodos de reamostragem mais usados (figura 2.1): vizinho mais próximo, interpolação bilinear e convolução cúbica (*www.nrcan.gc.ca*). O método do vizinho mais próximo atribui ao pixel da imagem corrigida, o nível de cinzento do pixel mais próximo desse na imagem original. Na interpolação bilinear o nível de cinzento do pixel na imagem corrigida é calculado pela média ponderada dos 4 pixels vizinhos deste na imagem original. Na convolução cúbica, a estratégia é a mesma da interpolação bilinear, no entanto em vez de 4 pixels é feita a média ponderada dos 16 pixels mais próximos.

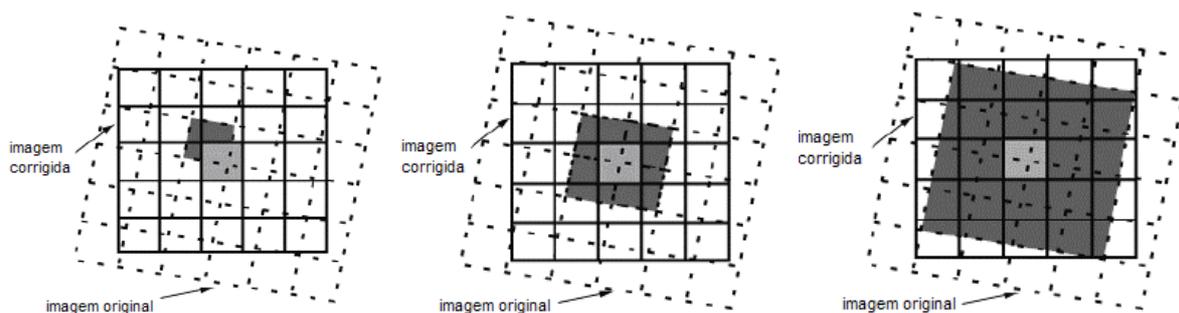


Figura 2.1: Métodos de reamostragem: vizinho mais próximo (esquerda), interpolação bilinear (centro) e convolução cúbica (direita).

2.1.1 Brovey

O método de Brovey é um dos métodos mais simples de fusão de imagens, que pode ser aplicado a três bandas multiespectrais. As bandas da imagem fundida são calculadas a partir da normalização de cada uma das bandas da imagem MS original e multiplicadas pela imagem P, como mostra a equação 2.1 (Wehrmann *et al*, 2005).

$$\begin{aligned}R_{fundida} &= \frac{R}{R + G + B} * P \\G_{fundida} &= \frac{G}{R + G + B} * P \\B_{fundida} &= \frac{B}{R + G + B} * P\end{aligned}\tag{2.1}$$

2.1.2 IHS

Este método de fusão de imagens assenta na transformação entre os modelos de cor RGB e IHS.

No modelo de cor RGB, cada cor aparece nas suas componentes espectrais primárias vermelho (R), verde (G) e azul (B). Este modelo é baseado num sistema de coordenadas cartesianas, tal como exemplifica a figura 2.2.

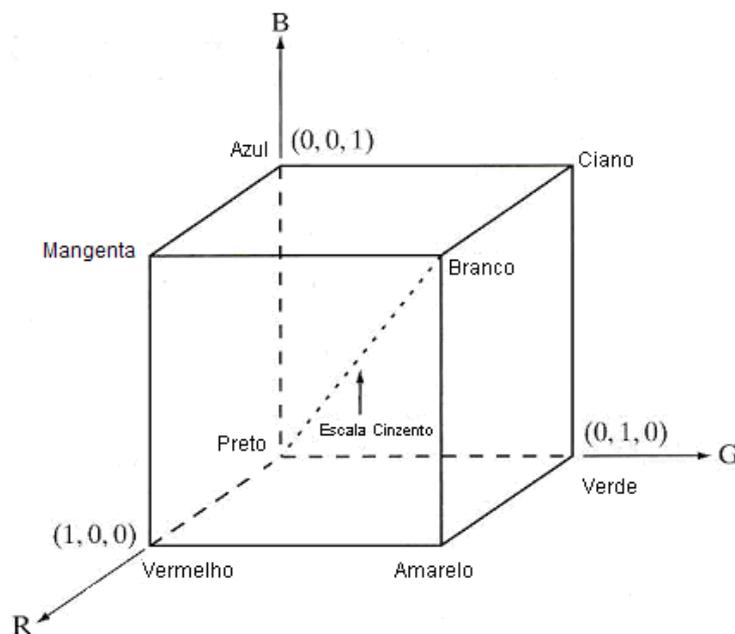


Figura 2.2: Representação do cubo de cor RGB (adaptado de Gonzalez, 2002).

No espaço de cor IHS (intensidade, matiz, saturação), a componente H é um atributo de cor que descreve a cor pura, a componente S é uma medida associada ao grau de quanto a cor pura é diluída pela luz branca, e a componente I é um parâmetro subjectivo relacionado com a maior ou menor luminosidade, não tendo qualquer relação com a componente cromática.

Cada ponto do modelo de cor RGB pode ser convertido para um ponto do modelo IHS (figura 2.3). O espaço IHS é representado por um eixo vertical correspondente à intensidade (eixo que liga a cor preto à cor branco) e pela posição dos pontos de cor que estão sobre o plano perpendicular a esse eixo.

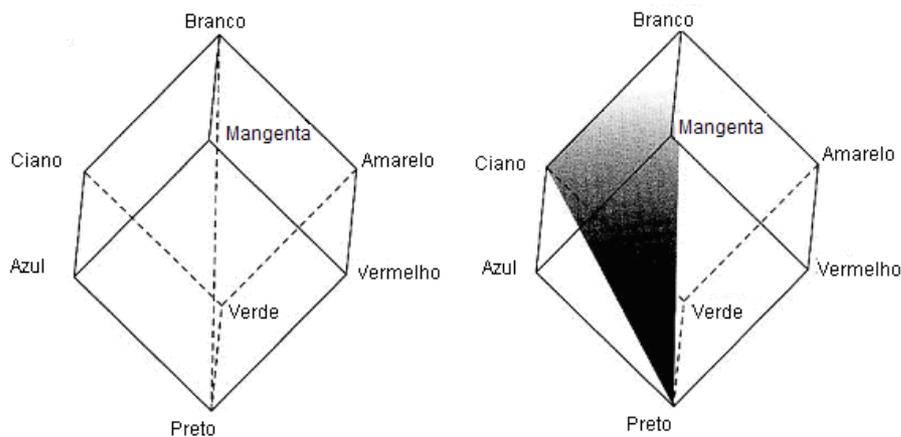


Figura 2.3: Relação entre os modelos de cor RGB e IHS (adaptado de Gonzalez, 2002).

Três versões do modelo IHS são possíveis: hexacónico, cilíndrico e triangular. A figura 2.4 (Gonzalez, 2002) apresenta a representação geométrica dos modelos de cor RGB, IHS hexacónico, IHS cilíndrico e IHS triangular, para um valor constante de I.

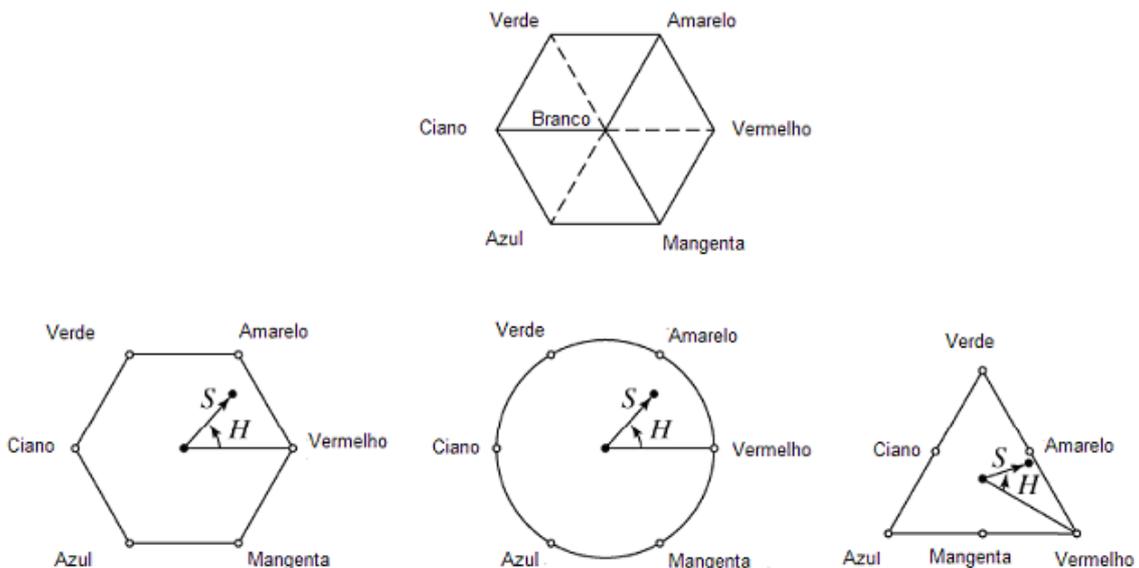


Figura 2.4: Representação dos modelos de cor RGB (em cima), IHS hexacónico (em baixo, à esquerda), IHS cilíndrico (em baixo, ao centro) e IHS triangular (em baixo, à direita), para um valor constante de I.

O método de fusão IHS é relativamente simples e eficaz embora bastante limitado, visto só poder ser aplicado a três bandas multiespectrais (Wald, 2002). O primeiro passo deste método consiste em transformar uma imagem RGB produzida a partir da imagem multiespectral para o modelo IHS. A relação entre as componentes I, H, S e as componentes R, G, B está apresentada na equação 2.2.

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{1}{3}(R + G + B) \\
 S &= 1 - \frac{3}{(R + G + B)}[\min(R, G, B)] \\
 H &= \cos^{-1} \left[\frac{\frac{1}{2}[(R - G) + (R - B)]}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} \right]
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

O passo seguinte consiste em modificar a imagem P, adaptando o seu histograma (P') por forma a ficar aproximadamente com a mesma variância e média que a componente I. Em seguida substitui-se a componente I pela nova imagem pancromática (P').

A última fase do processamento consiste em aplicar a transformação inversa do modelo IHS, transformando a imagem de novo para R, G, B (Wald, 2002). A figura 2.5 apresenta um esquema das várias fases do processo.

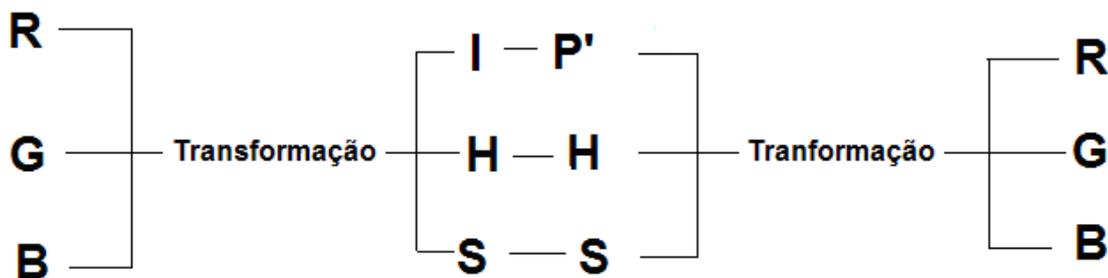


Figura 2.5: Representação esquemática do processamento do método IHS.

2.1.3 PCA

Este método é relativamente semelhante ao IHS, sendo contudo mais geral, e podendo ser aplicado a um qualquer número de bandas (Wald, 2002).

Para efectuar a fusão, em primeiro lugar, calculam-se as componentes principais da imagem multiespectral. Em seguida a primeira componente principal, contendo a maior parte de variância do conjunto de dados, é substituída pela imagem pancromática após uma adaptação do respectivo histograma (P'). Por último, a nova versão das componentes principais é convertida de volta ao espaço inicial (Cao *et al*, 2003).

2.1.4 Wavelet

O método Wavelet é mais recente que os anteriormente referidos e de mais difícil implementação. O método apoia-se no uso de coeficientes Wavelet, os quais ajudam a determinar características estruturais (detalhes) nas imagens. A interpretação destes detalhes depende da resolução da imagem, a qual será hierarquicamente decomposta numa pirâmide de múltiplas resoluções, como ilustra a figura 2.6 (Ranchin *et al*, 2003).

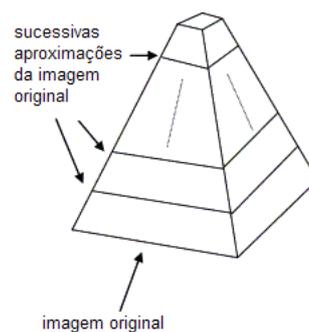


Figura 2.6: Pirâmide de múltiplas resoluções.

O método de fusão Wavelet compreende a construção de quatro imagens para a P : uma de baixa resolução (P_b) e três de grande detalhe correspondentes às componentes horizontal, vertical e diagonal (Han & Kang, 2004). Posteriormente, efectua-se uma adaptação do histograma da imagem MS , obtendo-se uma nova versão MS' . A imagem P_b , é substituída pela versão MS' . Por fim, é efectuada a transformação inversa para obter a imagem fundida. O processo descrito está apresentado esquematicamente na figura 2.7, onde h representa a componente horizontal, v a componente vertical, d a componente diagonal e a a imagem resultante da substituição da imagem P_b pela imagem MS' .

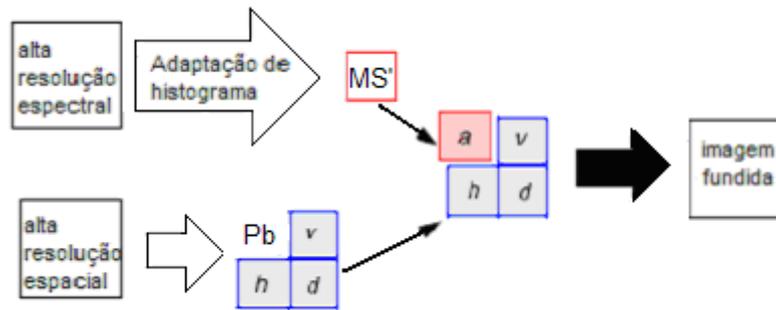


Figura 2.7: Representação esquemática do funcionamento do método Wavelet (adaptado de Balcik & Sertel, 2007).

O método Wavelet pode ainda ser utilizado em combinação com um de três modelos: banda única, IHS ou PCA (*Erdas Field Guide 2005*).

O modelo banda única permite utilizar uma só banda multiespectral para efectuar a fusão.

O modelo IHS aplicado ao método Wavelet consiste em transformar a imagem multiespectral nas componentes I, H, S e substituir a componente I pelo histograma adaptado da imagem pancromática (primeira parte do método de fusão IHS). Em seguida aplica-se o método Wavelet, usando como imagem pancromática a imagem resultante da substituição anterior. A imagem final obtida do método Wavelet corresponde à nova imagem de intensidade no método IHS. Finalizando, aplica-se a transformação IHS inversa, convertendo as componentes I, H e S no espaço RGB.

No que diz respeito ao Wavelet PCA, o procedimento é semelhante ao do Wavelet IHS. Calculam-se as componentes principais da imagem multiespectral e a primeira componente é substituída pelo histograma adaptado da imagem pancromática (primeira parte do método PCA). Aplica-se em seguida o método Wavelet, usando como imagem pancromática a imagem resultante da substituição anterior. A imagem final obtida do método Wavelet corresponde à nova primeira componente principal do método PCA. Por fim, as componentes principais resultantes são convertidas no espaço inicial.

2.2 Metodologias de avaliação do processo de fusão

Um aspecto importante relacionado com o processo de fusão de imagens é a avaliação dos resultados obtidos. É importante conhecer a qualidade e fiabilidade do método de fusão

utilizado. A qualidade da imagem fundida depende não só do método usado como também dos respectivos dados. A avaliação da fusão é geralmente feita através de uma análise comparativa dos histogramas das imagens espectrais antes e depois da fusão ou, comparando os resultados de um determinado processamento (como por exemplo, classificação de imagem) aplicado à imagem fundida e à imagem multiespectral original (Wald et al, 1997).

Dadas as imagens de baixa resolução espacial B_l e de alta resolução espacial A_h , o problema consiste em criar imagens B^* a partir do conjunto de imagens originais: $B^* = f(A, B)$. Segundo Ranchin et al (2003), a fusão de imagens deve respeitar as três propriedades seguintes:

I. *Qualquer imagem fundida B_h^* uma vez degradada à resolução original l , deve ser o mais idêntica possível à imagem original B_l .*

$$D_1(B_{kl}, B_{kl}^*) < \varepsilon_{1k},$$

onde D_1 é a distância entre B_{kl} e B_{kl}^* para a banda espectral k . ε_{1k} é o limite do grau de precisão esperado, que deve ser pequeno para todos os k , de forma a assegurar a semelhança entre os conjuntos B_l e B_l^* .

Um exemplo da distância D_1 é a raiz quadrada da média do quadrado das diferenças $(B_{kl} - B_{kl}^*)$ para cada pixel. Um valor típico de ε_{1k} é $0.05 \times \overline{B_{kl}}$, onde $\overline{B_{kl}}$ é o valor médio de B_{kl} .

II. *Qualquer imagem fundida B_h^* deve ser o mais idêntica quanto possível da imagem B_h , que seria observada pelo sensor multiespectral caso possuísse resolução espacial h .*

$$D_2(B_{kh}, B_{kh}^*) < \varepsilon_{2k},$$

onde D_2 é a distância entre B_{kh} e B_{kh}^* para a banda espectral k . ε_{2k} é o limite do grau de precisão esperado, que deve ser pequeno para todos os k , de forma a assegurar a semelhança entre os conjuntos B_h e B_h^* .

Um exemplo da distância D_2 é a raiz quadrada da média do quadrado das diferenças $(B_{kl} - B_{kl}^*)$ para cada pixel. Um valor típico de ε_{2k} é $0.05 \times \overline{B_{kl}}$, onde $\overline{B_{kl}}$ é o valor médio de B_{kl} .

III. O conjunto das bandas que compõem a imagem multiespectral fundida B_h^* deve ser tão idêntico quanto possível ao conjunto das bandas da imagem multiespectral B_h , que o sensor correspondente observaria se possuísse a resolução espacial h .

$$D_3(B_h, B_h^*) < \varepsilon_3,$$

onde D_3 é a distância entre os conjuntos B_h e B_h^* . ε_3 é o limite do grau de precisão esperado.

Um exemplo da distância D_3 é a quantidade ERGAS, definida pela equação 2.3, onde $\frac{h}{l}$ é o quociente entre as resoluções espaciais das imagens originais pancromática e multiespectral, N é o número de bandas, B_k é a banda k da imagem original, $\overline{B_k}$ é o valor médio de B_k e $RMSE(B_k) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (B_k(i) - B_k^*(i))^2}$ sendo n o número de pixels e B_k^* a banda k da imagem fundida.

$$ERGAS = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{(RMSE(B_k))^2}{\overline{B_k}^2}} \quad (2.3)$$

O valor limite, da quantidade ERGAS, que determina que o resultado da fusão é satisfatório é 3. Se o valor for superior a 3, a fusão proporciona resultados de fraca qualidade (Wald, 2002).

A propriedade I pode ser analisada através de uma avaliação da qualidade espacial, e as propriedades II e III através de uma avaliação da qualidade espectral.

2.2.1 Avaliação da qualidade espacial da imagem fundida

A avaliação da qualidade espacial da imagem fundida é feita por meio de uma imagem diferença. A imagem fundida é degradada para a mesma resolução da imagem multiespectral original. Em seguida é calculada, pixel a pixel, a diferença absoluta entre as duas imagens obtendo-se uma imagem diferença. Quanto mais próximos de zero estiverem os valores na imagem diferença, maior a semelhança entre as imagens fundida e original (Meenakshisundaram & Couloigner, 2005).

2.2.2 Avaliação da qualidade espectral da imagem fundida

A avaliação da qualidade espectral da imagem fundida é feita através de técnicas estatísticas. Estas técnicas permitem analisar as semelhanças e diferenças entre a imagem fundida e a original. As mais usadas são a média, a raiz quadrada do erro médio, o coeficiente de correlação e a distância euclidiana.

A diferença entre as médias da imagem fundida e da imagem original deve ser, em condições ideais, nula.

A raiz quadrada do erro médio (RMSE do inglês Root Mean Square Error) dá uma ideia da distorção induzida por cada método (Wehrmann *et al*, 2005). A equação 2.4 permite determinar o RMSE, que em condições ideais deverá ser zero.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{MN} (x_k - y_k)^2}{M \times N}} \quad (2.4)$$

onde x/y é o valor do pixel na imagem original/fundida, k é a posição do pixel e, M/N é o número de linhas/colunas da imagem.

O coeficiente de correlação (R) entre a imagem fundida e a imagem original deverá ser, em condições ideais, um (Scheunders & De Backer, 2001). O coeficiente de correlação entre as duas imagens pode ser calculado usando a equação 2.5.

$$R = \frac{\sum_{k=1}^{MN} (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^{MN} (x_k - \bar{x})^2 \sum_{k=1}^{MN} (y_k - \bar{y})^2}} \quad (2.5)$$

onde x/y é o valor do pixel na imagem original/fundida, \bar{x}/\bar{y} é o valor médio dos pixels da imagem original/fundida, k é a posição do pixel e M/N é o número de linhas/colunas da imagem.

A distância euclidiana média (DE) entre a imagem fundida e a original deverá ser, em condições ideais, zero (Wang *et al*, 2005). Em condições não ideais, quanto menor o valor de DE, maior a semelhança entre as duas imagens. A distância euclidiana média pode ser calculada usando a equação 2.6.

$$DE = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{MN} (x_k - y_k)^2}}{M \times N} \quad (2.6)$$

onde x/y é o valor do pixel na imagem original/fundida, k é a posição do pixel e M/N é o número de linhas/colunas da imagem.

2.3 Avaliação da qualidade do processo de fusão na literatura

Os métodos de avaliação, da qualidade das imagens resultantes do processo de fusão, descritos anteriormente foram usados por alguns autores, os quais apresentaram os seus resultados em vários artigos científicos. Nesta secção é feito um breve resumo dos trabalhos publicados.

Sanjeevi et al (2001) concluíram que no método Wavelet cerca de 85% da informação espectral é preservada na imagem fundida, enquanto que no método PCA é preservada 62,5% da informação, no método Brovey 53% e no método IHS 43%. Verificou-se assim que o Wavelet é o melhor método de fusão quando se trata de características espectrais. No entanto, em relação a características espaciais este método não se revela tão bom, visto que são introduzidas na imagem fundida distorções.

Vijayaraj et al (2004) concluíram que no método Wavelet a imagem fundida apresenta uma maior correlação com a imagem original, seguindo-se os métodos PCA, Brovey e IHS. Além desta medida, os autores avaliaram a fusão usando o RMSE, observando que o método que apresenta um menor valor é o Wavelet (para todas as bandas) sendo o método de Brovey o que apresenta maior valor.

Karathanassi et al (2007) direccionaram o seu estudo para dois conjuntos de dados distintos: o primeiro usando imagens com bastante área coberta de vegetação e outro com imagens que possuem áreas urbanas e marítimas. Tanto num caso como noutro, o método com melhores resultados, a nível espectral, foi o Wavelet. No entanto estes autores concluíram que a nível espacial este método introduz algumas distorções provocadas por ruído, tornando-se o PCA uma melhor opção que o Wavelet do ponto de vista espacial.

Han & Kang (2004) avaliaram os métodos de fusão utilizando imagens multiespectrais do satélite Landsat e imagens pancromáticas provenientes do satélite Arirang (satélite Coreano,

lançado em Dezembro de 1999). No final concluíram que o método Wavelet produz melhores resultados que os restantes métodos de fusão testados. Zhou et al (1998) efectuaram um estudo semelhante, usando imagens Landsat TM e SPOT, de uma região com diferentes tipos de ocupação de solo (áreas urbanas, água, solo seco, floresta...). Concluíram também que o melhor método é o Wavelet, quer espacialmente, quer espectralmente, apesar de não deixarem de mencionar a presença de pequenas distorções.

Vijayaraj (2004) utilizou imagens SPOT para estudar a fusão, avaliando parâmetros estatísticos como entropia, RMSE, coeficiente de correlação e desvio padrão para vários métodos de fusão. Concluiu nos seus estudos que o método que apresenta os melhores valores em todos os parâmetros é o Wavelet.

Hill et al (1999) estudaram os métodos de fusão em imagens de 4 bandas do sensor IRS_1D através da correlação e RMSE. Verificaram que para qualquer banda o melhor método é o Wavelet, à excepção da banda 4 (correspondente à banda do infravermelho próximo, considerada a mais problemática para fusão) cujo melhor resultado é apresentado pelo método de Brovey.

As conclusões apresentadas pelos vários autores anteriormente citados, indicam que o método Wavelet é o que apresenta melhores resultados na fusão de imagens. Embora possam surgir algumas distorções na imagem fundida, em geral este método supera os outros três métodos testados (Brovey, IHS e PCA), quer a nível espectral quer espacial.

No entanto, é de notar que os conjuntos de dados experimentais reportados são diferentes, o que torna difícil a comparação e generalização dos resultados apresentados.

3.

Produção de imagens sintéticas

O interesse e a aplicabilidade das técnicas de fusão de imagens desencadearam um considerável desenvolvimento, quer dos próprios algoritmos de fusão, quer dos métodos de avaliação do seu desempenho (pixel a pixel, ou banda a banda). No entanto, não houve grandes desenvolvimentos na avaliação dos resultados da fusão para conjuntos de pixels ou combinação de bandas. O objectivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia para este tipo de avaliação através de medidas quantitativas.

Uma das dificuldades em efectuar avaliações quantitativas de resultados de fusão de imagens é a falta de imagens multiespectrais de alta resolução que possam ser usadas como referência na comparação com a imagem resultante da fusão. Na tentativa de solucionar este problema desenvolveu-se uma metodologia baseada em imagens sintéticas, as quais são construídas a partir de assinaturas (relativas a diferentes tipos de ocupação de solo) de uma imagem de satélite.

O processo de construção das imagens sintéticas requer, em primeiro lugar, a criação de uma imagem base que simule e represente um terreno com parcelas de tamanho e localização conhecidas. Em seguida, é necessário atribuir às parcelas da imagem base diferentes tipos de ocupação de solo, ao atribuir a cada uma delas uma assinatura de uma imagem de satélite. Para efeitos de fusão, a partir destas imagens sintéticas serão construídas a imagem pancromática (de alta resolução) e a imagem multiespectral de mais baixa resolução. Este processo foi implementado usando programação em C e o software PCIGeomatica V8.2 (*PCI Geomatics, 2005*).

3.1 Imagem base

A imagem base pretende representar parcelas de terreno de vários tamanhos e com diferentes tipos de ocupação do solo, sendo que duas parcelas vizinhas não podem ter a mesma classe de ocupação do solo. O algoritmo desenvolvido permite ao utilizador especificar as características da imagem base, através de quatro parâmetros: número de classes c (diferentes tipos de ocupação do solo), número de pixels da parcela unitária u , parâmetro de escala s , e parâmetro de repetição r . O significado de cada um destes parâmetros torna-se mais perceptível recorrendo aos exemplos apresentados na figura 3.1, para imagens base com $c=4$, 5 e 6, todas com $u=4$, $s=4$ e $r=2$.

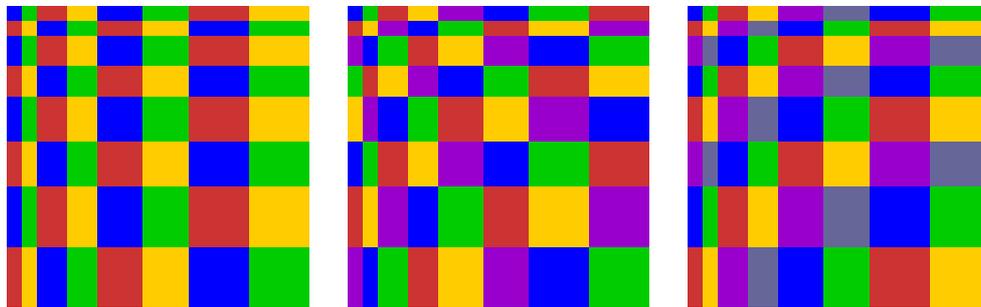


Figura 3.1: Imagens base com $c=4$ (esquerda), $c=5$ (centro) e $c=6$ (direita), todas com $u=4$, $s=4$, $r=2$.

Nestes exemplos $u=4$, o que significa que a parcela unitária (canto superior esquerdo (CSE)) tem 4×4 pixels, enquanto que a parcela do canto inferior direito (CID) tem 16×16 pixels, uma vez que $s=4$. O parâmetro de repetição, $r=2$ significa que há duas colunas e duas linhas de cada tipo, logo quatro parcelas de cada tamanho. Assim, existem 4 parcelas de uma unidade (4×4 pixels), e no geral existem 4 parcelas de $i \times j$ unidades, com $i, j=1, 2, 3, 4$. No total existem 64 parcelas.

Generalizando, para uma imagem base de parâmetros s , u , r e c , existem r^2 parcelas de $i \times j$ unidades, com $i, j=1, 2, \dots, s$ e $(s \times r)^2$ parcelas no total.

O tamanho da imagem base ($M=N$, número de linhas/colunas) pode ser calculado pela equação 3.1.

$$M = N = \frac{r \times u \times s \times (s + 1)}{2} \quad (3.1)$$

Os valores de M e N nos exemplos da figura 3.1 são ambos 80.

Em seguida são apresentados alguns exemplos onde se pode observar alterações na imagem base, devido a variações dos parâmetros.

3.1.1 Parâmetro c – Número de classes

A figura 3.2 ilustra o efeito da variação do parâmetro c , relacionado com o número de classes. Na figura mostram-se quatro imagens base com $c=6,5,4$ e 3 , sendo os restantes parâmetros fixos ($s=7, u=3, r=3$).

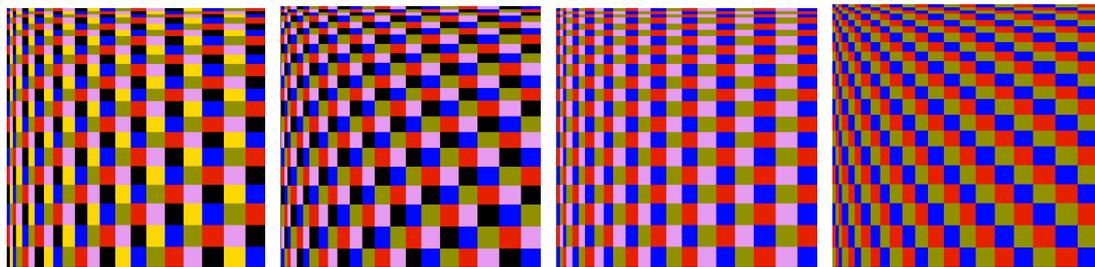


Figura 3.2: Imagens base para $c=6, c=5, c=4, c=3$ sendo os restantes parâmetros fixos ($s=7, u=3, r=3$).

Como o número de classes (c) vai diminuindo, o número de cores na imagem diminui na mesma proporção. No entanto, o número de classes não interfere no tamanho da imagem nem das parcelas, tendo cada uma destas imagens base 252×252 pixels e parcelas de dimensão igual (num total de 441 parcelas).

3.1.2 Parâmetro s – Escala

A figura 3.3 ilustra o efeito da variação do parâmetro s , relacionado com a escala. Na figura mostram-se quatro imagens base com $s=5,6,7$ e 8 , sendo os restantes parâmetros fixos ($u=3, r=3, c=6$).

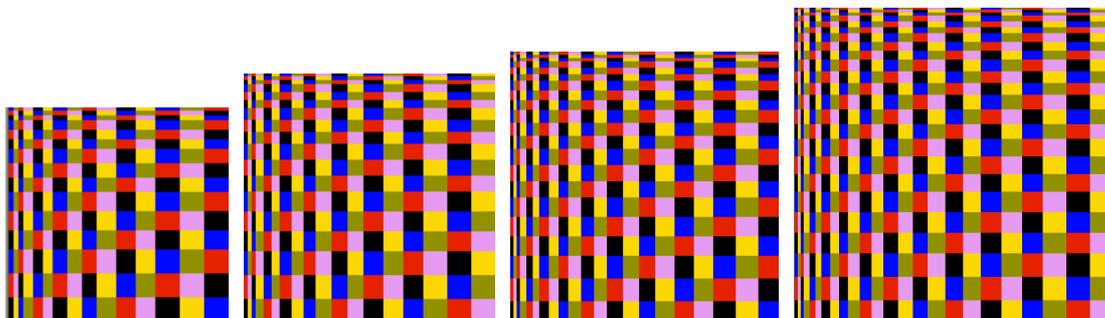


Figura 3.3: Imagens base para $s=5, s=6, s=7, s=8$ sendo os restantes parâmetros fixos ($u=3, r=3, c=6$).

A variação de escala (s) influencia o tamanho da imagem. Ao incrementar o seu valor de 5 até 8 as imagens criadas têm os tamanhos de 135x135, 189x189, 252x252 e 324x324 pixels, respectivamente. Observa-se também um aumento do número de parcelas: 225, 324, 441 e 576 respectivamente, apesar da dimensão das parcelas manter-se igual.

3.1.3 Parâmetro u – Tamanho da parcela unitária

A figura 3.4 ilustra o efeito da variação do parâmetro u , relacionado com o tamanho da parcela unitária. Na figura mostram-se quatro imagens base com $u=2,3,4$ e 5 , sendo os restantes parâmetros fixos ($s=7, r=3, c=6$).

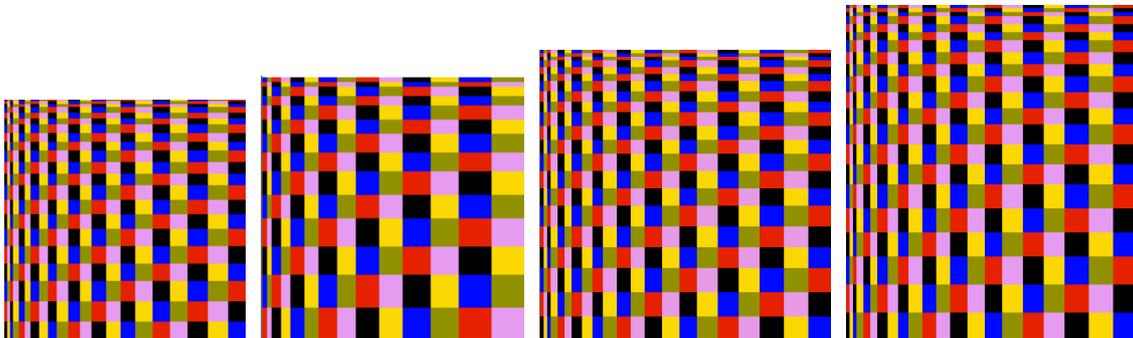


Figura 3.4: Imagens base para $u=2, u=3, u=4, u=5$ sendo os restantes parâmetros fixos ($s=7, r=3, c=6$).

A variação do número de pixels numa unidade (u) de 2 até 5 dá origem a imagens com tamanhos 168x168, 252x252, 336x336 e 420x420 pixels, respectivamente. Ao contrário do que se verifica com o parâmetro s , a variação de u não altera o número de parcelas (441 parcelas), mas a dimensão das parcelas é alterada visto que se altera o número de pixels da unidade (quanto maior u , maior a parcela).

3.1.4 Parâmetro r – Repetição

A figura 3.5 ilustra o efeito da variação do parâmetro r , relacionado com a repetição. Na figura mostram-se quatro imagens base com $r=2,3,4$ e 5 , sendo os restantes parâmetros fixos ($s=7, u=3, c=6$).

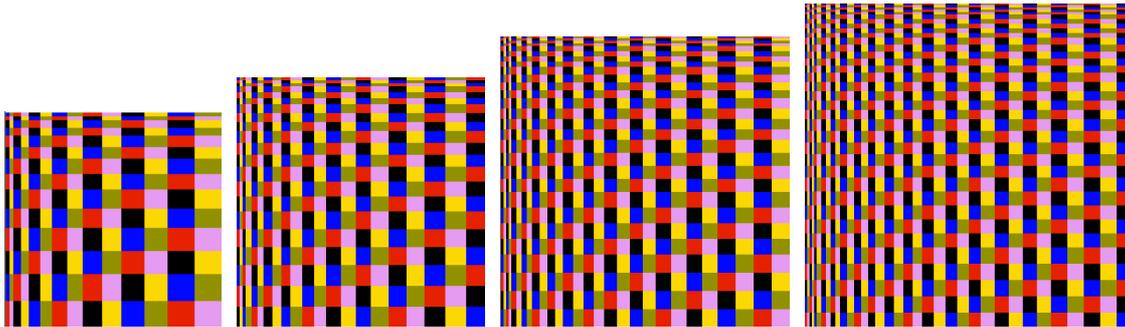


Figura 3.5: Imagens base para $r=2$, $r=3$, $r=4$, $r=5$ sendo os restantes parâmetros fixos ($s=7$, $u=3$, $c=6$).

Também a variação do parâmetro de repetição (r) provoca uma alteração do tamanho da imagem. $r=2,3,4,5$ resulta em imagens com tamanhos 168×168 , 252×252 , 336×336 e 420×420 pixels, respectivamente. É também responsável pelo aumento do número de parcelas (196, 441, 784, 1225, respectivamente).

3.2 Produção de imagens sintéticas multiespectrais

Para criar as imagens sintéticas multiespectrais são inicialmente identificadas, numa imagem multiespectral real, parcelas com diferentes tipos de ocupação de solo. Este processo é ilustrado na figura 3.6, com uma imagem multiespectral (RGB) onde foram identificadas quatro zonas para quatro classes de ocupação do solo. A localização destas quatro áreas pode ser vista na imagem a preto e branco (direita). A imagem multiespectral usada para obter a assinatura espectral das classes de ocupação do solo é designada ao longo do trabalho por imagem de referência.



Figura 3.6: Imagem multiespectral (esquerda) e identificação de quatro tipos de ocupação de solo (direita).

A imagem base e a imagem de referência são usadas para gerar a imagem sintética multiespectral (MF). Esta imagem tem o mesmo número de bandas da imagem de referência e a partir dela são posteriormente criadas duas outras imagens: a imagem PAN (pancromática de alta resolução) e a imagem ML (multiespectral de baixa resolução).

Para tal são efectuados os seguintes passos:

3.2.1 Assinaturas espectrais

A identificação das zonas de caracterização das classes de ocupação do solo pode ser feita em qualquer “software”, sendo apenas necessário registar as coordenadas da zona (rectangular) associada a cada classe.

A criação das imagens sintéticas é auxiliada por um ficheiro de texto, o qual contém os parâmetros de entrada relativos à imagem de referência. No ficheiro é necessário introduzir o número de bandas, o número de linhas e colunas de cada banda e o nome das bandas. Nele é também definido o número de parcelas e respectivos limites (canto superior esquerdo e canto inferior direito).

```

+++++ Input parameters for Synt-Fus program +++++
+++++
+++++ Number of bands, No. pixels, No lines +++++
+++++ and file names (1 for each band) +++++
+++++
3
2048
2048
C:\SinteticasSPOT\ImRef_b1.raw
C:\SinteticasSPOT\ImRef_b2.raw
C:\SinteticasSPOT\ImRef_b3.raw
+++++
+++++ Number of classes and >min >max >min >max +++++
+++++ (4 parameters / 5 lines per class) +++++
+++++
6
143
149
1734
1738
146
154
1665
1677
84
116
1526
1557
120
126
9
12
101
118
1751
1772
188
192
1920
1925
+++++
+++++ Parameters for creation of Panchromatic image +++++
+++++ Weight for each band : one line for each weight +++++
+++++
0.617
0.383
0

```

Figura 3.7: Ficheiro de texto de suporte à construção das imagens sintéticas.

Uma vez preenchidos todos os parâmetros no ficheiro de texto, o programa desenvolvido lê a informação sobre o número de bandas, a dimensão da imagem e nome das bandas. Com estes dados carrega as imagens em memória para o seu posterior processamento.

Em seguida, é retirada informação sobre o número de classes e respectivos limites. Os limites são definidos por quatro valores: X_{min} , X_{max} - o número de colunas; Y_{min} , Y_{max} - o número de linhas. Por conseguinte, para cada banda são extraídas das áreas definidas as assinaturas referentes a cada classe. Obtém-se assim um número de vectores de dimensão igual à dimensão da imagem de referência para cada classe.

3.2.2 Criar a imagem sintética (MF)

Com as assinaturas recolhidas no passo anterior é possível a criação das bandas da imagem sintética multiespectral.

Para criar cada uma das bandas, o software (programa criado em linguagem C), percorre pixel a pixel a imagem base. Cada um destes pixels está definido como pertencendo a uma certa classe. Desta forma, a cada pixel é atribuído um vector aleatório do conjunto de assinaturas da respectiva classe, representada na banda da imagem de referência em questão. Ou seja, para criar a banda sintética b , as assinaturas serão retiradas da banda b da imagem de referência.

Como exemplo, a figura 3.8 apresenta a imagem sintética multiespectral com $s=4$, $u=4$, $r=2$ e $c=4$, obtida a partir da imagem original apresentada na figura 3.6, usando como base a imagem da figura 3.1 (esquerda).

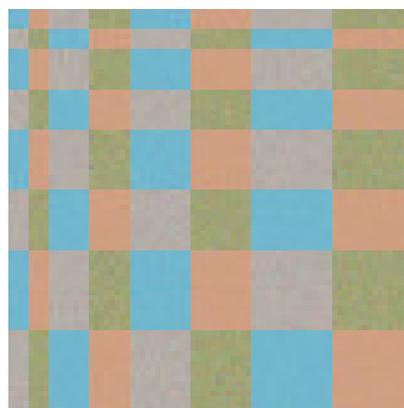


Figura 3.8: Imagem sintética multiespectral, produzida a partir da imagem de referência da figura 3.6 (com $s=4$, $u=4$, $r=2$, $c=4$).

3.2.3 Imagens ML e PAN

A imagem MF pretende ser uma imagem multiespectral de máxima resolução, que estaria disponível para um determinado sensor. Na realidade, em geral há apenas uma imagem pancromática com a resolução máxima mas com apenas uma banda, e uma imagem multiespectral de menor resolução espacial.

A partir da imagem MF geraram-se duas novas imagens: ML, com metade da resolução, e PAN com a mesma resolução.

Na imagem ML, o valor de cada pixel é dado pela média de quatro pixels da imagem MF. Por exemplo, o primeiro pixel da imagem ML pode ser calculado pela equação 3.2,

$$plres_{(1,1)} = \frac{(p_{(1,1)} + p_{(1,2)} + p_{(2,1)} + p_{(2,2)})}{4} \quad (3.2)$$

onde $plres_{(1,1)}$ corresponde ao 1º pixel da imagem ML (1ª linha e 1ª coluna) e $p_{(i,j)}$ representam os pixels na imagem MF, sendo i a linha e j a coluna.

A criação da imagem ML pela redução da imagem MF a metade da resolução, impõe que esta tenha tamanho par. Como nem sempre isso acontece (por exemplo, para $s=6$, $u=3$, $r=3$, $c=6$ tem-se 189 linhas por 189 colunas) é necessário alterar antecipadamente a imagem base (sem perder qualquer informação). Para tal, são adicionadas à imagem uma linha e uma coluna, cópias da linha e coluna adjacente (no exemplo dado, a imagem base ficaria com 190 linhas por 190 colunas, em que a 190ª linha/coluna teria valores numéricos iguais à 189ª linha/coluna).

A produção de uma imagem PAN a partir de MF depende da relação espectral entre as bandas da imagem multiespectral e pancromática do sensor simulado. Por exemplo para o SPOT 5 HRG, os “pesos” na construção da pancromática são: 0.617 para a banda 1, 0.383 para a banda 2 e 0.000 para a banda 3. Os valores destes parâmetros são passados para o software através do ficheiro de texto, podendo ser alterados pelo utilizador de acordo com o sensor que se pretende simular.

O valor de cada pixel na imagem PAN é calculado pela soma dos produtos de cada “peso” pelo pixel correspondente em cada banda espectral da imagem MF. No caso do SPOT 5 HRG, o valor do 1º pixel da imagem PAN, $pp1$, terá o valor determinado pela equação 3.3, onde $p1$ é o 1º pixel da banda 1 na imagem MF, $p2$ o 1º pixel da banda 2 na imagem MF e $p3$ o 1º pixel da banda 3 na imagem MF.

$$pp1 = 0.617 \times p1 + 0.383 \times p2 + 0.000 \times p3 \quad (3.3)$$

4.

Procedimento Experimental

Este trabalho pretende aplicar a metodologia de avaliação da qualidade da fusão a um conjunto de pixels, usando imagens sintéticas construídas a partir de imagens de satélite.

Duas imagens de satélite obtidas da mesma zona Norte de Portugal (uma adquirida pelo SPOT 5 HRG e outra pelo Landsat 5 TM) são usadas como imagens de referência, nas quais são identificados seis tipos diferentes de ocupação de solo.

Cada uma das imagens de referência é usada, juntamente com a imagem base (com os parâmetros $s=8$, $u=3$, $r=5$ e $c=6$), para construir as imagens MF, PAN e ML. Com as imagens ML e PAN é gerada uma imagem fundida.

Para avaliar o processo de fusão, são calculadas imagens NDVI a partir das imagens MF, ML e fundida. A avaliação é efectuada comparando os valores numéricos de NDVI das imagens MF e fundida e das imagens MF e ML, em cada parcela da imagem base.

A figura 4.1 mostra um esquema do procedimento experimental deste trabalho. Inicialmente, uma imagem multiespectral de satélite (Referência) e uma imagem base (Base) simulando parcelas de localização e tamanhos conhecidos, são usadas para criar uma imagem sintética multiespectral de alta resolução (MF) com o mesmo número de bandas da imagem de referência.

A partir da imagem MF são geradas duas novas imagens sintéticas: uma PAN (pancromática, com uma só banda) com a mesma resolução de MF, e uma ML (multiespectral com o mesmo número de bandas da imagem MF) de baixa resolução. Estas duas novas imagens (PAN e ML) são usadas no processo de fusão para gerar a imagem fundida (Fusão) multiespectral de alta resolução.

No final é necessário avaliar a qualidade do resultado da fusão. Para tal são criadas imagens NDVI a partir das imagens MF (NDVI MF), fundida (NDVI Fusão) e ML (NDVI ML (I) e NDVI ML (II)).

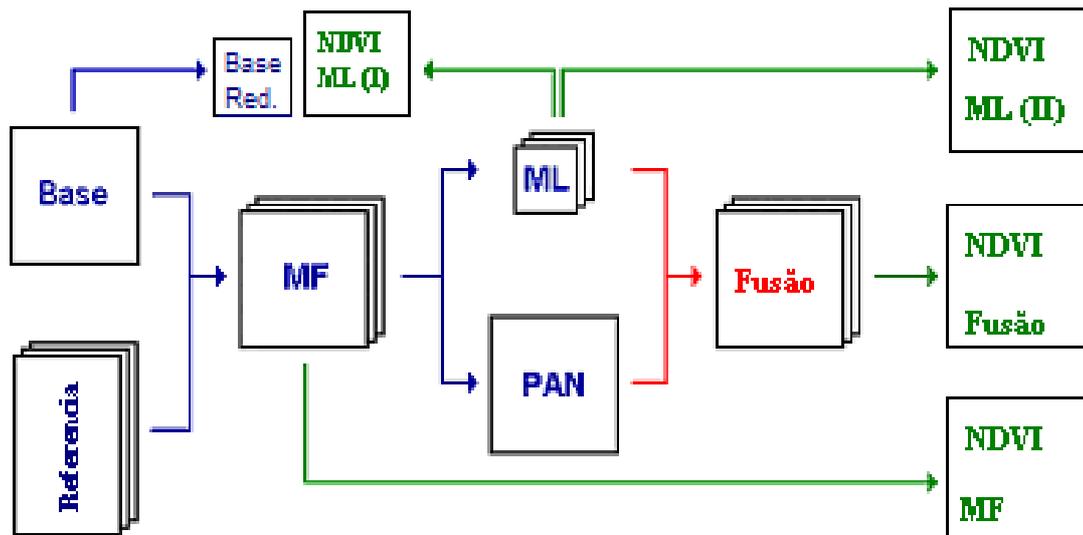


Figura 4.1: Representação esquemática do procedimento experimental adoptado neste estudo.

4.1 Área de estudo

Definiu-se uma área de teste no Norte de Portugal, Montalegre (41°49'N 7°47'W), caracterizada por frequentes variações de altitude e exposição que favorecem uma diferenciação ecológica e a criação de uma grande diversidade de Habitats. Os sistemas de agricultura conferem à paisagem retalhada um mosaico de cores e texturas, marcadas pela acção do homem ao longo dos tempos. Nesta região predominam agro-sistemas tradicionais característicos da agricultura de montanha: lameiros, baldios e culturas anuais constituídas pelas searas de centeio e as hortas para o auto-consumo.

Os lameiros são pastagens semi-naturais permanentes, de origem centenária, profundamente interligados com os diversos agro-sistemas que caracterizam a agricultura tradicional de montanha do Norte e Centro de Portugal. Localizam-se preferencialmente em zonas com elevada disponibilidade hídrica, solos férteis e normalmente em cotas superiores a 700m, distribuindo-se por condições ecológicas muito diversas. De acordo com as suas disponibilidades de água, as pastagens podem classificar-se em lameiros de regadio (disponibilidade de água durante todo o ano), lameiros de regadio imperfeito (disponibilidade de água insuficientes para todo o verão) e lameiros de sequeiro (não são regados). Os lameiros constituem não só um importante património cultural e paisagístico, como também genético.

Os baldios são áreas comunitárias, geralmente abertas e extensas com predomínio de espécies arbustivas destinadas ao pastoreio. Nas formações florestais predominam os carvalhos, castanheiros e pinheiros sendo de destacar nos bosques ripícolas o amieiro, salgueiro, freixo e videiro (*Pôças et al, 2006*).

4.2 Imagens satélite

Foram utilizadas duas imagens de satélite da área de estudo, uma adquirida pelo SPOT 5 HRG em Junho de 2005 e outra adquirida pelo Landsat 5 TM em Junho de 1997.

O SPOT 5 tem a bordo o sensor HRG com resolução espacial de 10m, operando em quatro bandas com comprimentos de onda: 0.5 a 0.59 μm , 0.61 a 0.68 μm , 0.79 a 0.89 μm e 1.52 a 1.75 μm (*Baudoin, 1995*).

O Landsat 5 tem a bordo o sensor TM que opera em sete bandas com comprimentos de onda centrais de 0.49 μm , 0.56 μm , 0.66 μm , 0.83 μm , 1.65 μm , 11.457 μm e 2.22 μm e resolução espacial de 30m, excepto na banda seis, cuja resolução espacial é de 120m (*Sobrino et al, 2004*).

Embora os satélites SPOT e Landsat possuam quatro e sete bandas, respectivamente, neste trabalho só são usadas três bandas correspondentes ao verde, vermelho e infravermelho próximo. Isto é, as bandas 1, 2 e 3 do SPOT HRG e as bandas 2, 3 e 4 do Landsat TM.

As figuras 4.2 e 4.3 mostram as imagens adquiridas pelo satélite SPOT e pelo Landsat.

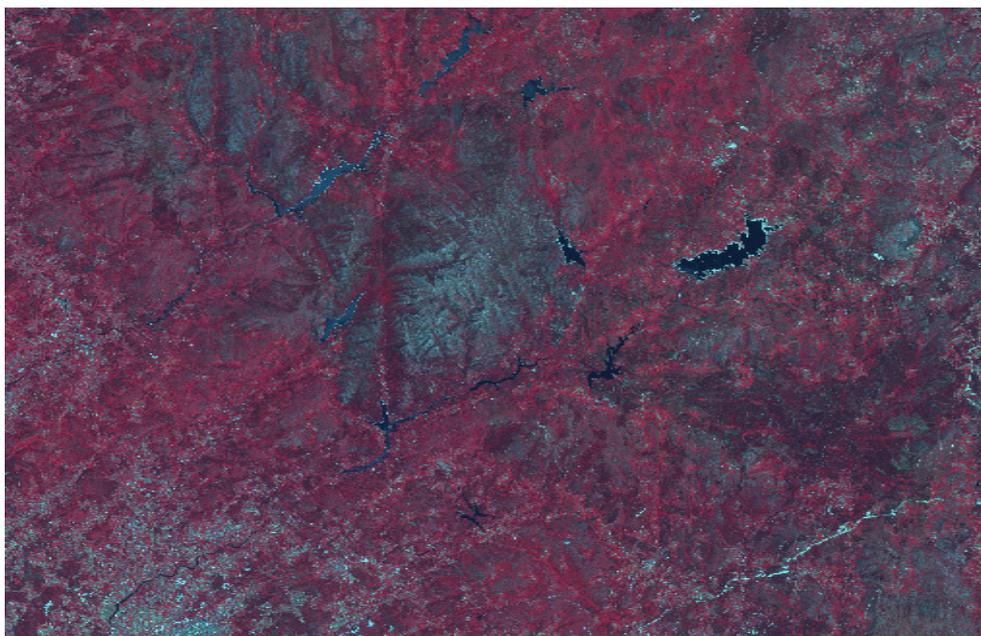


Figura 4.2: Imagem SPOT HRG utilizada (composição RGB 321).

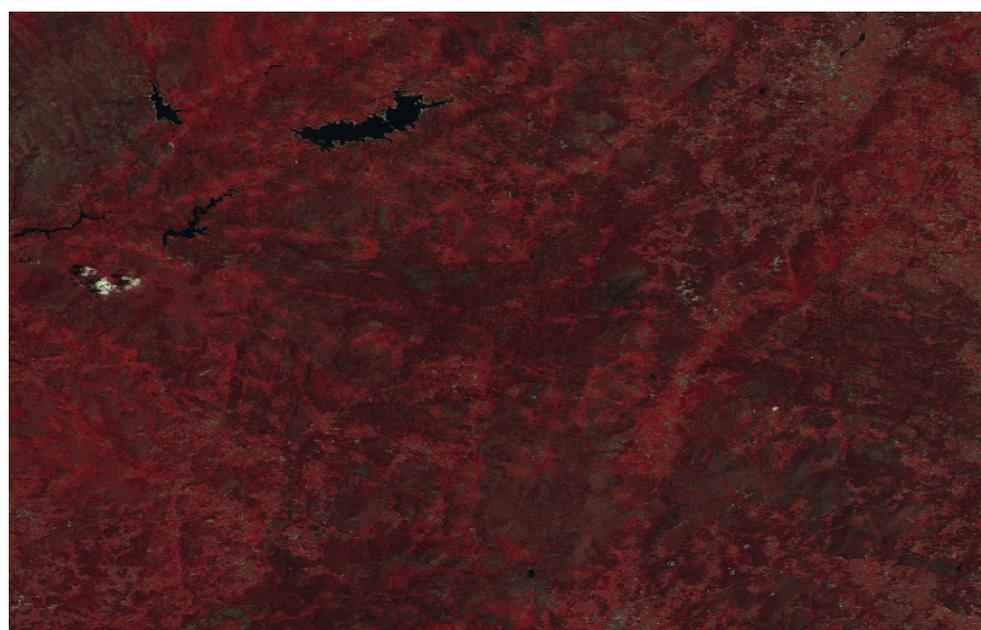


Figura 4.3: Imagem Landsat TM utilizada (composição RGB 432).

Em cada uma das imagens de satélite foram identificadas seis áreas correspondentes a diferentes tipos de ocupação de solo. As figuras 4.4 e 4.5 mostram, à esquerda, as imagens de referência SPOT e Landsat e, à direita, as seis classes seleccionadas.

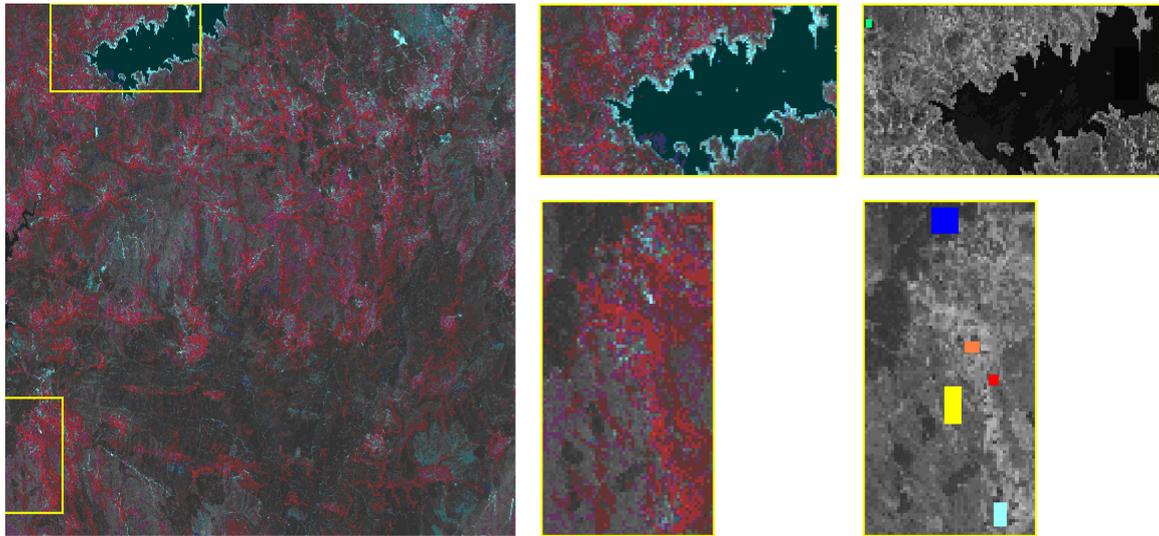


Figura 4.4: Imagem de referência SPOT com 6 classes de ocupação de solo (mata de caducifólias (verde), mata de perenifólias (azul), lameiro de regadio (laranja), lameiro de sequeiro (vermelho), baldios (amarelo) e culturas anuais (azul claro)).

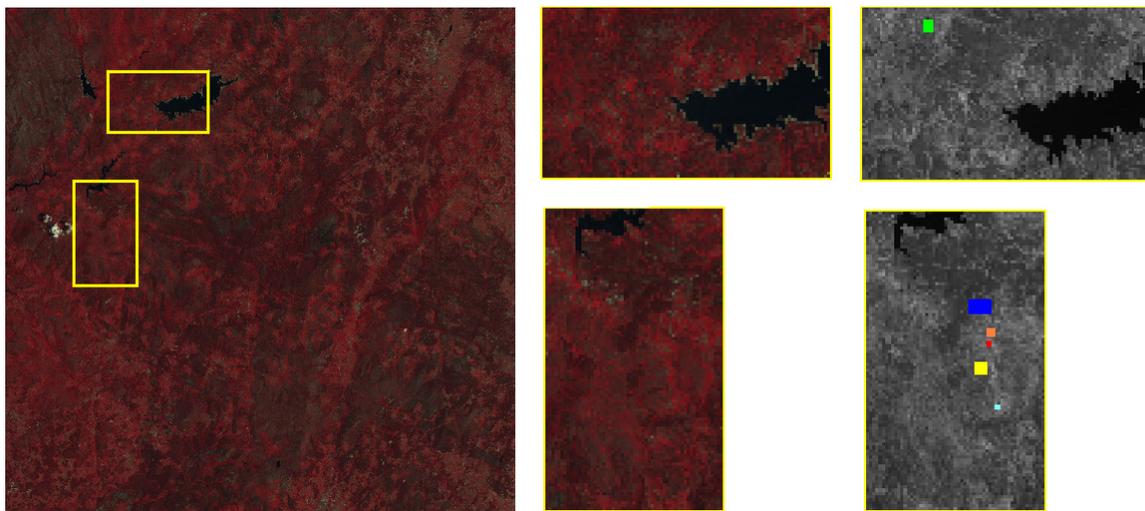


Figura 4.5: Imagem de referência Landsat com 6 classes de ocupação de solo (mata de caducifólias (verde), mata de perenifólias (azul), lameiro de regadio (laranja), lameiro de sequeiro (vermelho), baldios (amarelo) e culturas anuais (azul claro)).

Estas classes foram usadas com a imagem base ($s=8$, $u=3$, $r=5$ e $c=6$) para criar duas imagens sintéticas multiespectrais MF, uma para SPOT e outra para Landsat. A figura 4.6 mostra as imagens MF, depois de uma equalização do histograma para uma melhor visualização.

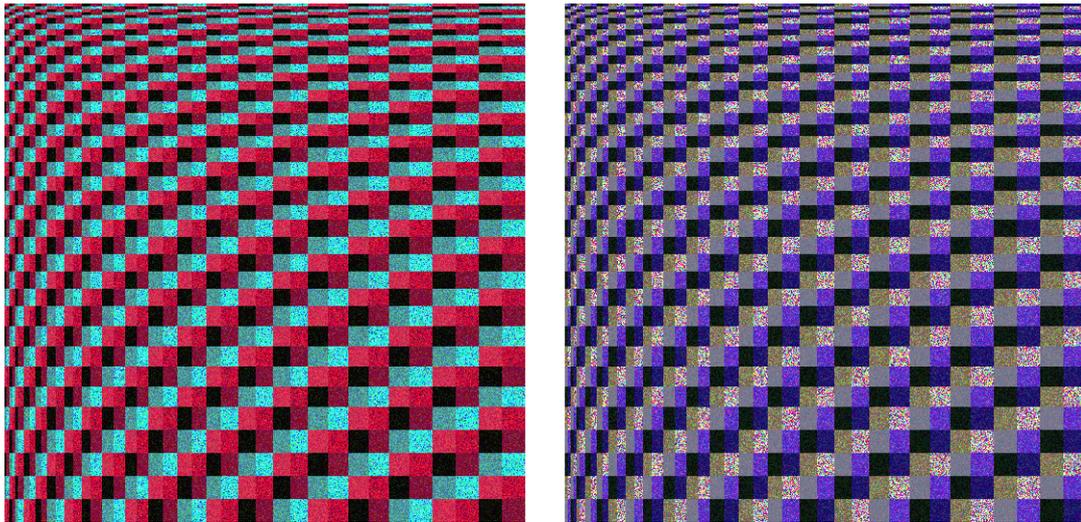


Figura 4.6: Imagens sintéticas multiespectrais para SPOT (esquerda) e Landsat (direita), após equalização de histograma.

A partir das imagens sintéticas MF são geradas as imagens PAN e ML, as quais são utilizadas como parâmetros de entrada no processo de fusão.

4.3 Metodologia de avaliação

Neste trabalho, a avaliação dos resultados da fusão de imagens não foi feita usando as abordagens tradicionais, efectuadas pixel a pixel ou banda a banda, mas usando medidas quantitativas para conjuntos de pixels. Para tal, foram efectuados estudos associados ao índice de vegetação NDVI, para cada parcela da imagem base.

O índice de vegetação NDVI é calculado usando a expressão $\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$ (Jensen, 2000), onde NIR corresponde à reflectância na banda de infravermelho próximo e RED à reflectância na banda do vermelho. A expressão, contudo, necessita primeiro de ser adaptada de acordo com o satélite de onde provém a imagem, usando parâmetros de calibração.

Para o SPOT 5 HRG, a reflectância da banda i é dada pela equação 4.1 (FIFE, 2004), e para o Landsat 5 TM é dada pela equação 4.2 (GAEL, 2003), onde ρ_i é a reflectância na banda i , θ_s o ângulo zenital solar, θ_v o ângulo de incidência, E_{0i} a irradiância equivalente

espectral solar para a banda i , d a distância terra-sol, $E'_{0i} = \frac{E_{0i}}{\left(\frac{d}{d'}\right)^2}$, com $\frac{d}{d'} = 1$, a energia

recebida pelo sensor em condições de reflector perfeito, e R_i é a radiância da banda i .

$$\rho_i = \frac{\pi R_i}{E'_{0i} \cos(\theta_s) \cos(\theta_v)} \text{ com } R_i = \frac{DN - offset}{Ganho} \quad (4.1)$$

$$\rho_i = \frac{\pi R_i}{E'_{0i} \cos(\theta_s) \left(\frac{1}{d}\right)^2} \text{ com } R_i = Ganho \times DN + offset \quad (4.2)$$

A partir das equações 4.1 e 4.2 e dos parâmetros de calibração (apresentados na tabela 4.1), as reflectâncias da banda RED e NIR para o SPOT 5 HRG são dadas pelas equações 4.3 e 4.4, e para o Landsat 5 TM, essas reflectâncias são dadas pelas equações 4.5 e 4.6, respectivamente.

$$\rho_{RED} = 0,001106 \times DN \quad (4.3)$$

$$\rho_{NIR} = 0,002835 \times DN \quad (4.4)$$

$$\rho_{RED} = 0,002109 \times DN - 0,01124 \quad (4.5)$$

$$\rho_{NIR} = 0,003226 \times DN - 0,01704 \quad (4.6)$$

Tabela 4.1: Parâmetros de calibração para os satélites SPOT 5 HRG e Landsat 5 TM.

(fontes: SPOT website, Maia, 2007 e GAEL, 2003)

Parâmetros	SPOT 5 HRG	Landsat 5 TM
Ângulo de incidência	29°,65	_____
Elevação do sol	69°,17	63°,9
Irradiância equivalente espectral solar	RED: 1575 NIR: 1047	RED: 1557 NIR: 1047
Ganho	RED: 2,221034 NIR: 1,303200	RED: 0,9388 NIR: 0,9655
Offset	RED: 0 NIR: 0	RED: -5 NIR: -5,1

As duas imagens sintéticas das bandas NIR e RED são usadas para gerar uma imagem NDVI através da equação 4.7. A construção das imagens sintéticas NDVI foi implementada em software na linguagem de programação C.

$$NDVI = \max\left\{0, \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}\right\} \quad (4.7)$$

Os valores da imagem NDVI estão compreendidos entre 0 e 1. Para uma melhor visualização das imagens, estes valores são escalonados para um intervalo de 0 a 250 de forma a obter-se uma imagem em tons cinzentos. A figura 4.7 apresenta as imagens sintéticas obtidas para o SPOT (banda NIR, banda RED e NDVI) e a figura 4.8 apresenta os respectivos histogramas.

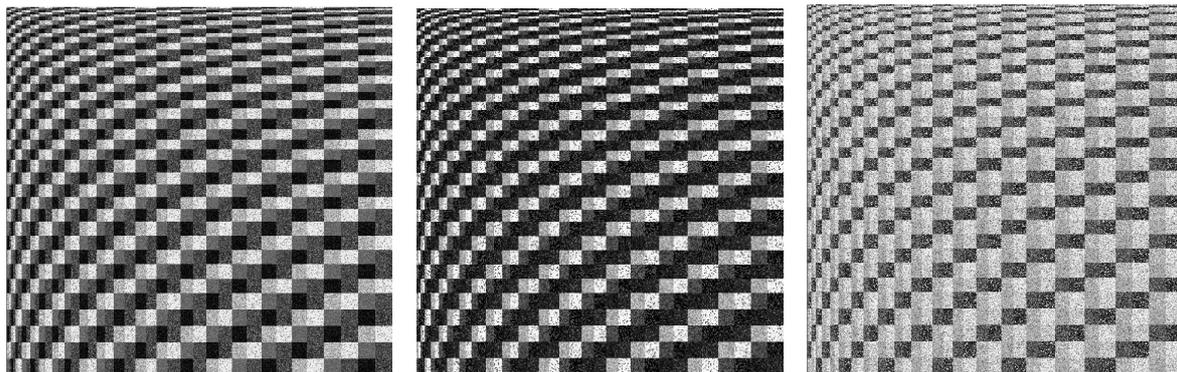


Figura 4.7: Imagens sintéticas SPOT banda NIR (esquerda), banda RED (centro) e NDVI (direita).

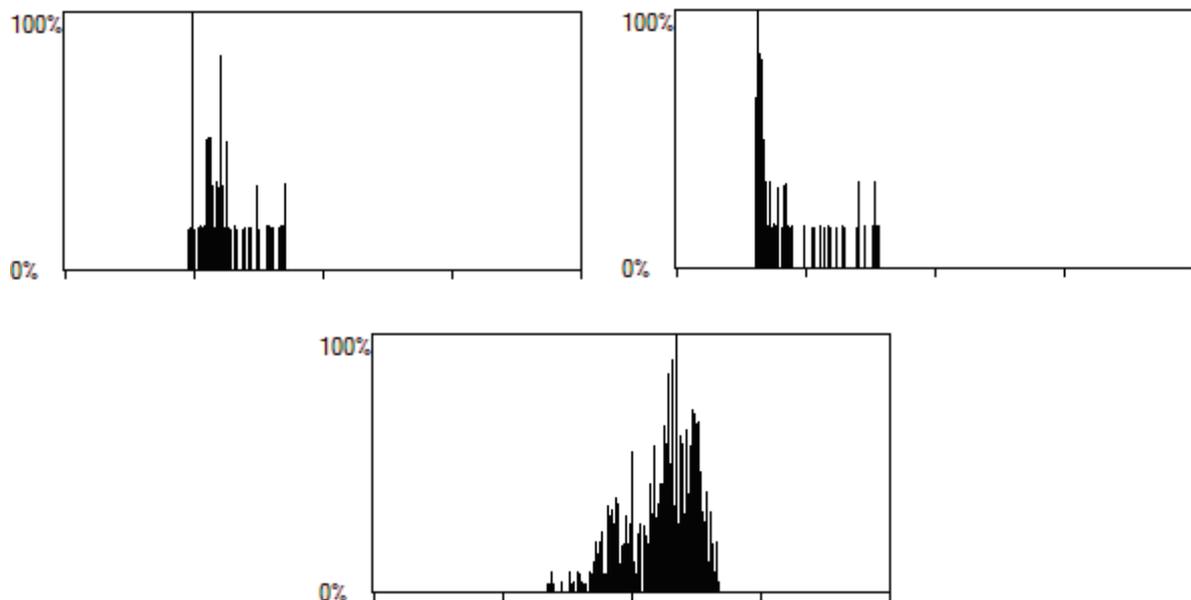


Figura 4.8: Histogramas das imagens apresentadas na figura 4.7: banda NIR (em cima, à esquerda), banda RED (em cima, à direita) e NDVI (em baixo).

Após a criação da imagem NDVI é calculado o NDVI médio de cada uma das 1600 parcelas $((s \times r)^2 = (8 \times 5)^2)$ da imagem base. O programa desenvolvido usa a imagem NDVI

gerada, e duas imagens auxiliares que permitem identificar as diferentes parcelas existentes e os respectivos tamanhos. Estas imagens auxiliares são apresentadas, com tabela de cores, na figura 4.9. O valor médio de NDVI, para cada linha e coluna da imagem base, é registado num ficheiro de texto (ver figura 4.10).

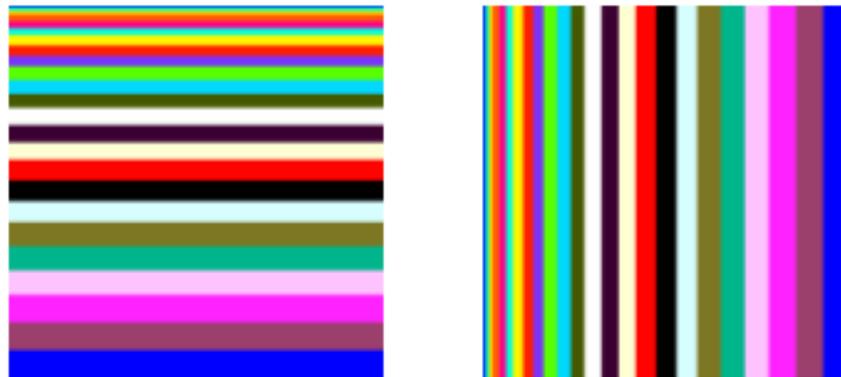


Figura 4.9: Imagens auxiliares linhas (esquerda) e colunas (direita) para cálculo de NDVI médio por parcela, para uma imagem base com $s=8$, $u=3$, $r=5$ e $c=6$.

NDVI_Médio.txt - Notepad			
File	Edit	Format	View Help
linha	coluna	NDVI_medio	
0	0	147	
0	1	155	
0	2	140	
0	3	154	
0	4	129	
0	5	113	
0	6	146	
0	7	152	
0	8	149	
0	9	153	
0	10	130	
0	11	125	
0	12	148	
0	13	153	
0	14	148	
0	15	157	
0	16	127	
0	17	117	
0	18	148	
0	19	156	
0	20	147	
0	21	155	
0	22	126	
0	23	120	
0	24	149	
0	25	156	
0	26	147	
0	27	153	
0	28	125	
0	29	125	
0	30	150	
0	31	153	
0	32	146	
0	33	154	
0	34	127	
0	35	126	
0	36	148	
0	37	155	
0	38	147	
0	39	150	
1	0	143	
1	1	151	
1	2	118	
1	3	113	
1	4	146	
1	5	150	
1	6	144	
1	7	155	
1	8	125	

NDVI_Médio.txt - Notepad			
File	Edit	Format	View Help
linha	coluna	NDVI_medio	
0	0	174	
0	1	198	
0	2	168	
0	3	193	
0	4	159	
0	5	167	
0	6	173	
0	7	199	
0	8	166	
0	9	194	
0	10	159	
0	11	163	
0	12	172	
0	13	202	
0	14	166	
0	15	194	
0	16	155	
0	17	164	
0	18	173	
0	19	198	
0	20	164	
0	21	193	
0	22	156	
0	23	163	
0	24	172	
0	25	199	
0	26	164	
0	27	195	
0	28	158	
0	29	171	
0	30	172	
0	31	198	
0	32	164	
0	33	193	
0	34	156	
0	35	169	
0	36	172	
0	37	199	
0	38	164	
0	39	194	
1	0	163	
1	1	192	
1	2	161	
1	3	161	
1	4	172	
1	5	198	
1	6	163	
1	7	195	
1	8	160	

Figura 4.10: Secção do ficheiro de texto com os valores de NDVI por parcela, para as imagens de teste SPOT (esquerda) e Landsat (direita).

A avaliação da qualidade da fusão é feita comparando os valores de NDVI calculados para a imagem fundida ($NDVI_{FUS}$) com os calculados a partir da imagem sintética multiespectral de alta resolução ($NDVI_{MF}$). A comparação é efectuada através dos seguintes parâmetros: erro absoluto em NDVI (δ , calculado a partir da equação 4.8), coeficiente de correlação (R), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e distância euclidiana média (DE). Esta metodologia de avaliação é possível usando imagens sintéticas, no entanto não é possível aplicá-la com imagens reais de satélite, uma vez que estes não conseguem adquirir imagens multiespectrais de alta resolução.

$$\delta = |NDVI_{FUS} - NDVI_{MF}| \quad (4.8)$$

Uma outra abordagem para avaliar a fusão consiste em obter os valores de NDVI a partir da imagem ML (multiespectral de baixa resolução) e compará-los com os obtidos para a imagem MF. Dado que as parcelas representadas na imagem base estão disponíveis apenas em alta resolução, esta abordagem terá que ser efectuada através de um dos seguintes casos (ver figura 4.1):

- (I) reduzindo a resolução da imagem base, de forma a corresponder à resolução da imagem ML;
- (II) aumentando a resolução da imagem ML por forma a corresponder à resolução da imagem base.

5.

Resultados

Os processos de fusão de imagens foram efectuados usando dois softwares distintos: PCI Geomatica v.8.2 (*PCI Geomatics, 2005*) e ERDAS IMAGINE v.8.7 (*Leica Geosystems, 2007*).

As imagens ML e PAN são usadas como parâmetros de entrada de seis métodos de fusão (Brovey, IHS modelo hexacónico, IHS modelo cilíndrico, PCA, Wavelet modelo IHS e Wavelet modelo banda única), sendo geradas no total seis imagens fundidas para cada uma das imagens de teste (SPOT e Landsat).

Para cada uma das imagens de teste foram produzidas nove imagens de NDVI: uma usando a imagem MF, duas usando a imagem ML, e seis usando as seis imagens obtidas por fusão. Todas estas imagens de NDVI têm alta resolução, excepto uma das imagens obtidas a partir de ML (ver figura 4.1).

Para as imagens de alta resolução, foram calculados os valores médios de NDVI para as 1600 parcelas da imagem base.

Os resultados obtidos a partir das imagens fundidas foram comparados com os obtidos a partir da imagem original MF. Consoante o método de fusão utilizado, os valores de NDVI poderão ser mais ou menos próximos dos valores originais de NDVI. Uma forma de analisar o grau de semelhança entre os NDVI médios das imagens originais e fundidas é através de um gráfico cartesiano. Se os valores de NDVI calculados para as imagens em comparação forem iguais, então estes situar-se-ão sobre a recta identidade, representada nas figuras 5.1 a 5.12. Por outro lado, quanto mais afastados estiverem da recta identidade maior será a diferença entre os dois valores de NDVI.

As figuras 5.1 a 5.6 apresentam a representação gráfica dos valores de NDVI das imagens fundidas (resultantes dos seis métodos de fusão), em comparação com os obtidos a partir da imagem MF, para a imagem de teste SPOT.

A análise dos gráficos permite constatar que os métodos de fusão que apresentam melhores resultados são o Brovey, o IHS hexacónico e o Wavelet IHS, uma vez que os valores tendem a posicionar-se mais próximo da recta identidade do que para os restantes métodos.

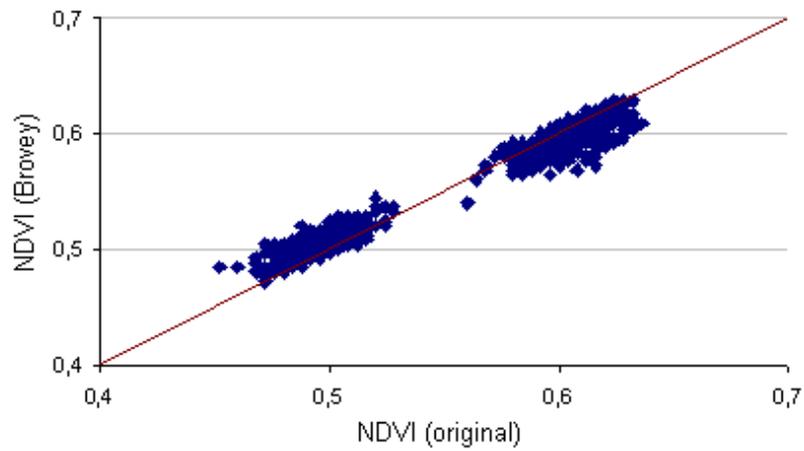


Figura 5.1: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens SPOT original e fundida pelo método de Broye.

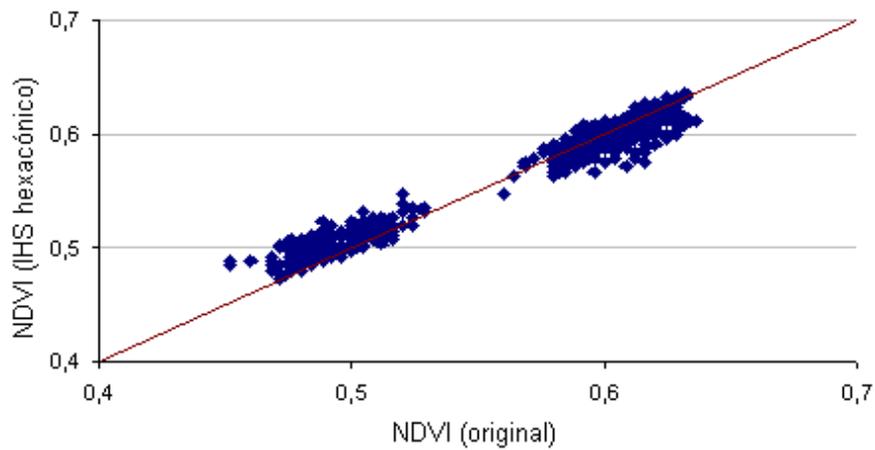


Figura 5.2: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens SPOT original e fundida pelo método IHS hexacónico.

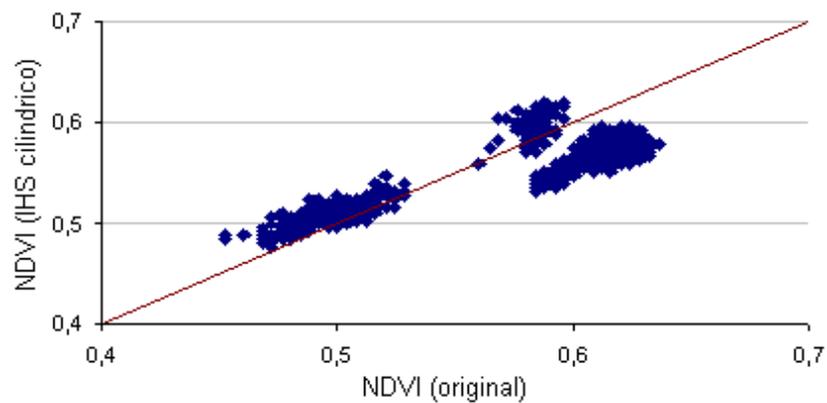


Figura 5.3: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens SPOT original e fundida pelo método IHS cilíndrico.

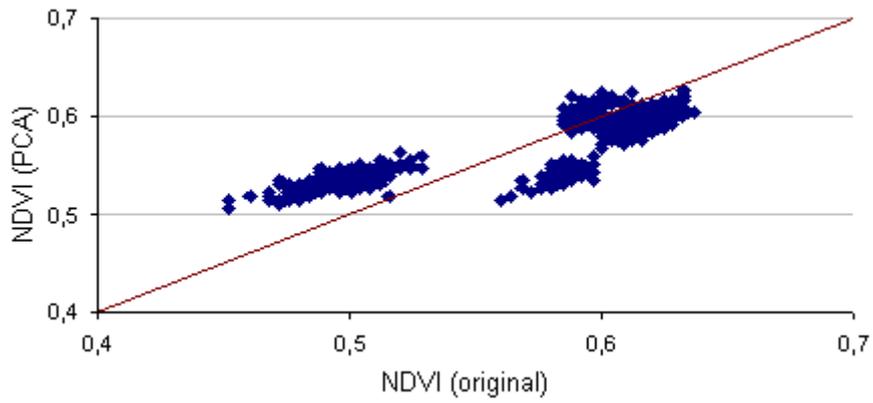


Figura 5.4: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens SPOT original e fundida pelo método PCA.

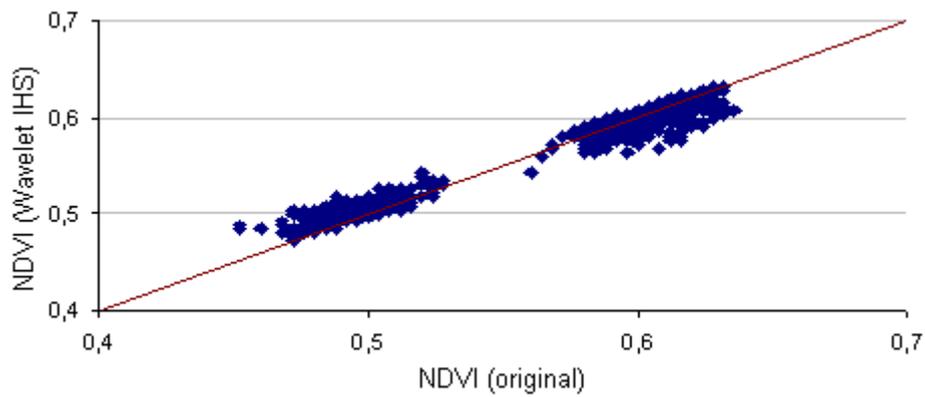


Figura 5.5: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens SPOT original e fundida pelo método Wavelet IHS.

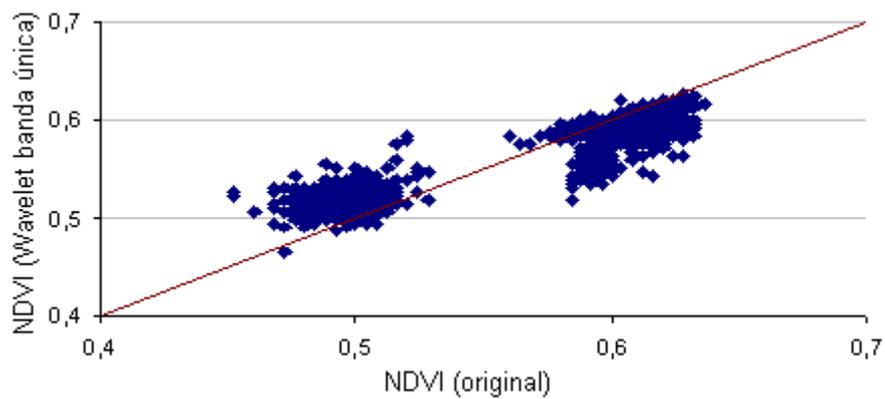


Figura 5.6: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens SPOT original e fundida pelo método Wavelet banda única.

A mesma análise foi efectuada para a imagem de teste Landsat usando os seis métodos de fusão anteriores. Os respectivos gráficos estão apresentados nas figuras 5.7 a 5.12.

A observação dos gráficos revela que o método IHS cilíndrico (figura 5.9), o PCA (figura 5.10), o Wavelet IHS (figura 5.11) e o Wavelet banda única (figura 5.12) são os que produzem melhores resultados. Ao contrário do que se verifica com a imagem de teste SPOT, os métodos Brovey e IHS hexacónico apresentam piores resultados (figura 5.7 e 5.8), havendo uma clara tendência das imagens fundidas sobrestimarem os valores de NDVI, particularmente no método de Brovey.

Analisando os resultados, para ambas as imagens de teste, verifica-se que o método Wavelet IHS obtém sempre melhores resultados que os restantes métodos testados.

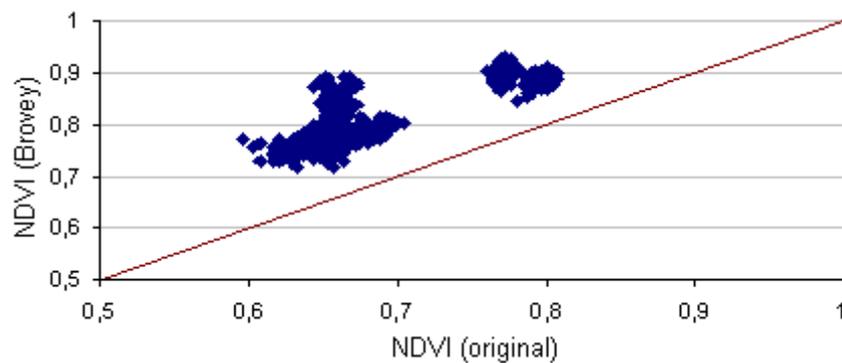


Figura 5.7: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens Landsat original e fundida pelo método de Brovey.

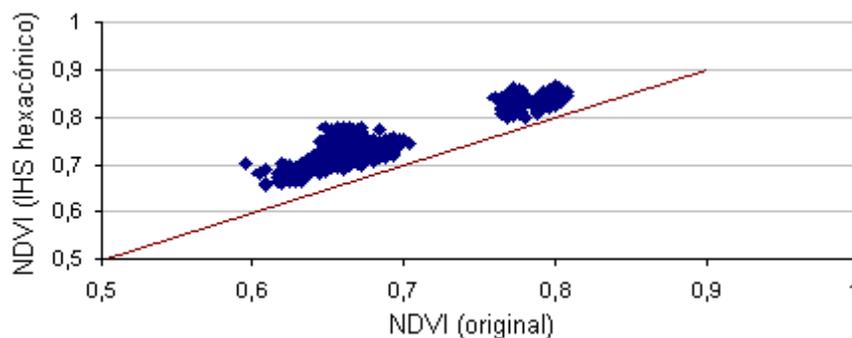


Figura 5.8: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens Landsat original e fundida pelo método IHS hexacónico.

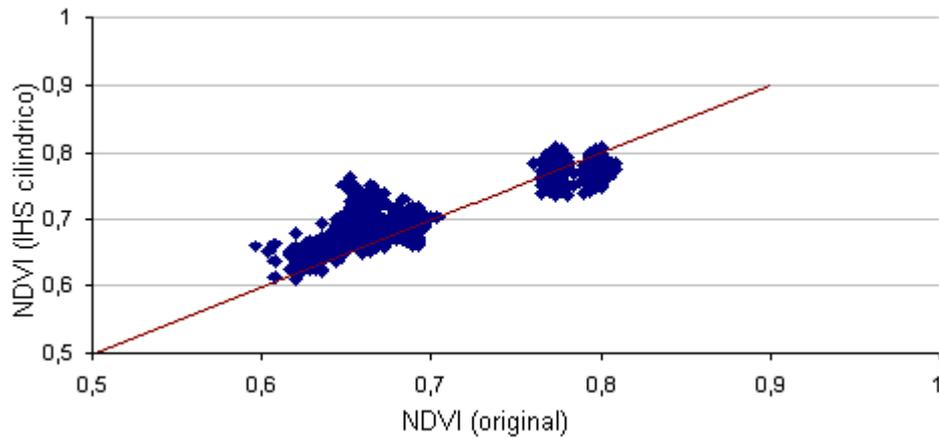


Figura 5.9: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens Landsat original e fundida pelo método IHS cilíndrico.

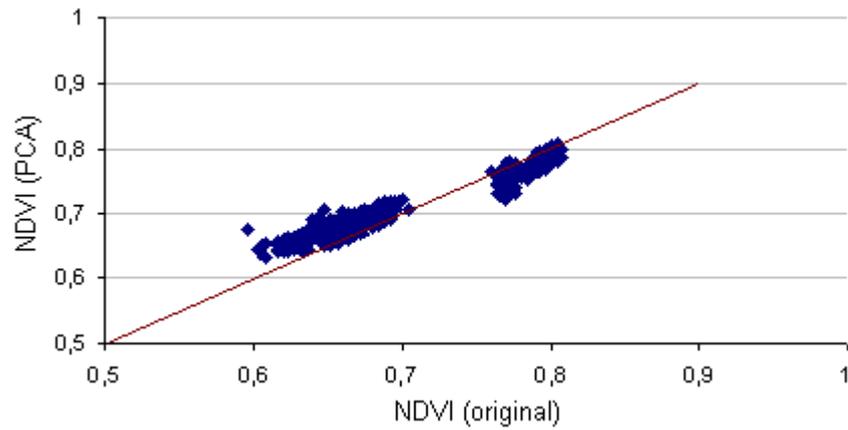


Figura 5.10: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens Landsat original e fundida pelo método PCA.

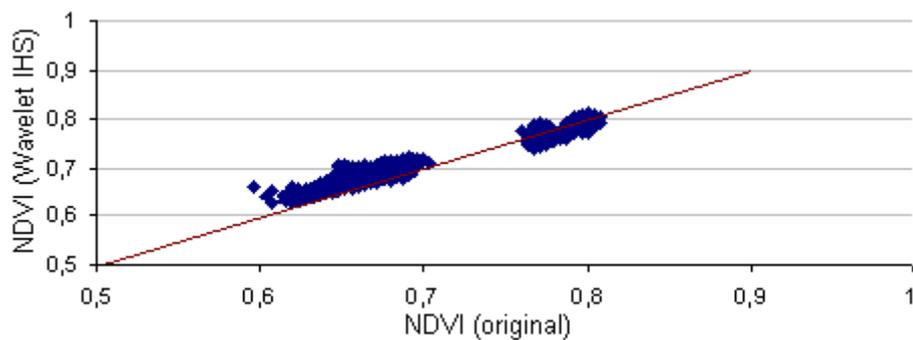


Figura 5.11: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens Landsat original e fundida pelo método Wavelet IHS.

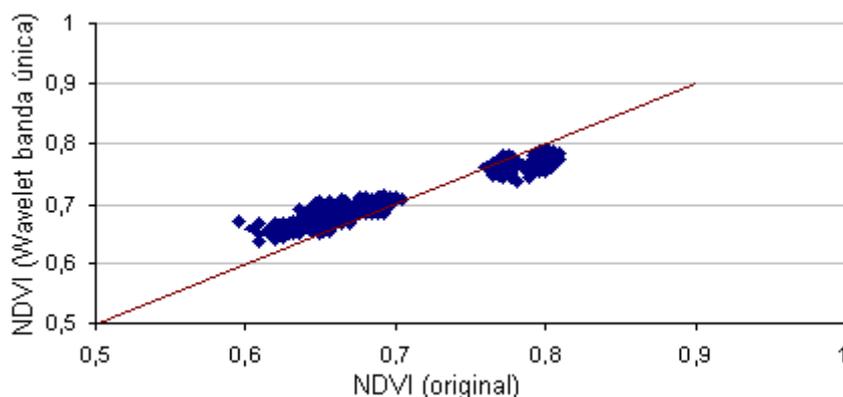


Figura 5.12: Valores médios de NDVI por parcela, calculados com as imagens Landsat original e fundida pelo método Wavelet banda única.

A média do erro absoluto em NDVI (δ) foi calculada para todas as imagens fundidas, para todas as parcelas quadradas com o mesmo tamanho. As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os resultados de $\delta \times 1000$ para as imagens de teste SPOT e Landsat, respectivamente. A negrito é realçado o melhor resultado para cada tamanho da parcela. Como era de esperar, à medida que aumenta o tamanho da parcela o valor de δ tende a diminuir, dado que a influência das parcelas vizinhas vai sendo cada vez menor.

Para a imagem de teste SPOT, os melhores métodos foram o Brovey, Wavelet IHS e IHS hexacónico por apresentarem valores de erros absolutos relativamente baixos (6.5, 6.7 e 7.2). Já no caso da imagem de teste Landsat os melhores métodos foram o PCA, o Wavelet IHS e o IHS cilíndrico, com erros absolutos de 13.4, 14.0 e 14.8, respectivamente. O método Brovey destaca-se neste conjunto de dados pelo facto de apresentar um bom resultado no caso SPOT mas, no entanto, um resultado pouco satisfatório quando aplicado à imagem de teste Landsat.

Tabela 5.1: Média do erro absoluto em NDVI ($\delta \times 1000$) para as parcelas quadradas e para os seis métodos de fusão, usando a imagem de teste SPOT.

Tamanho da parcela (unidades)	Brovey	IHS Cilíndrico	IHS Hexacónico	PCA	Wavelet IHS	Wavelet Banda única
1	14.0	30.7	13.9	31.2	13.8	32.8
2	17.3	37.4	15.4	31.0	16.2	36.5
3	7.7	25.1	6.9	25.9	7.7	16.0
4	0.8	19.7	4.3	21.8	2.6	6.2
5	2.4	19.5	3.8	23.5	2.1	10.1
6	5.9	25.9	4.5	24.2	5.6	17.3
7	3.2	21.0	3.8	23.5	3.0	10.2
8	1.0	20.3	4.6	22.6	2.2	6.2
Média	6.5	25.0	7.2	25.5	6.7	16.9

Tabela 5.2: Média do erro absoluto em NDVI ($\delta \times 1000$) para as parcelas quadradas e para os seis métodos de fusão, usando a imagem de teste Landsat.

Tamanho da parcela (unidades)	Brovey	IHS Cilíndrico	IHS Hexacónico	PCA	Wavelet IHS	Wavelet Banda única
1	131.5	30.6	66.2	22.9	24.2	24.8
2	109.3	29.3	55.8	22.6	23.4	23.8
3	122.1	14.6	60.0	12.6	12.2	13.6
4	123.5	7.2	58.2	6.9	9.9	11.2
5	128.3	9.8	59.4	11.7	11.8	13.3
6	118.4	11.2	57.1	11.7	9.9	14.7
7	124.8	8.8	57.8	11.0	10.6	12.3
8	132.2	7.0	58.1	7.7	10.2	11.8
Média	123.8	14.8	59.1	13.4	14.0	15.7

Uma análise similar foi efectuada, usando os valores de NDVI obtidos a partir da imagem ML. Para cada caso, I e II (apresentados no capítulo 4.3), os valores de NDVI obtidos para as parcelas quadradas do mesmo tamanho, foram comparadas com os valores obtidos a partir da imagem MF. Os resultados são apresentados nas tabelas 5.3 e 5.4 para as imagens de teste SPOT e Landsat, respectivamente.

Tabela 5.3: Média do erro absoluto em NDVI ($\delta \times 1000$) para as parcelas quadradas, calculada a partir da imagem ML SPOT.

Tamanho da parcela (unidades)	Caso I	Caso II
1	13.9	13.6
2	19.4	17.1
3	6.1	7.5
4	0.8	0.8
5	2.7	2.2
6	6.1	5.9
7	3.0	2.9
8	1.0	1.0
Média	6.6	6.4

Tabela 5.4: Média do erro absoluto em NDVI ($\delta \times 1000$) para as parcelas quadradas, calculada a partir da imagem ML Landsat.

Tamanho da parcela (unidades)	Caso I	Caso II
1	28.8	21.8
2	26.1	22.1
3	7.7	9.6
4	5.4	5.4
5	10.2	8.0
6	9.4	8.5
7	5.1	6.2
8	5.1	5.1
Média	12.2	10.8

Os resultados calculados a partir da imagem ML, registados nas tabelas em cima, são ligeiramente melhores que os obtidos pelas imagens fundidas, tanto para o SPOT como para o Landsat. Em ambas as imagens de teste o caso (II) apresenta melhores resultados que o caso (I).

Um estudo semelhante foi feito para os parâmetros de avaliação: coeficiente de correlação, raiz quadrada do erro médio e distância euclidiana média.

Os resultados obtidos para o coeficiente de correlação estão apresentados nas tabelas 5.5 a 5.8.

Tabela 5.5: Coeficiente de correlação para as parcelas quadradas e para os seis métodos de fusão, usando a imagem de teste SPOT.

Tamanho da parcela (unidades)	Brovey	IHS Cilíndrico	IHS Hexacónico	PCA	Wavelet IHS	Wavelet Banda Única
1	0.96	0.77	0.96	0.74	0.96	0.67
2	0.99	0.76	0.99	0.79	0.99	0.74
3	0.99	0.87	0.99	0.85	0.99	0.95
4	1.00	0.97	1.00	0.96	1.00	1.00
5	1.00	0.93	1.00	0.88	1.00	0.99
6	1.00	0.93	1.00	0.92	1.00	0.98
7	1.00	0.91	1.00	0.90	1.00	0.99
8	1.00	0.97	1.00	0.96	1.00	1.00
Média	0.99	0.89	0.99	0.88	0.99	0.91

Tabela 5.6: Coeficiente de correlação para as parcelas quadradas e para os seis métodos de fusão, usando a imagem de teste Landsat.

Tamanho da parcela (unidades)	Brovey	IHS Cilíndrico	IHS Hexacônico	PCA	Wavelet IHS	Wavelet Banda única
1	0.68	0.77	0.90	0.94	0.96	0.95
2	0.89	0.76	0.91	0.97	0.97	0.97
3	0.89	0.96	0.95	0.99	0.99	0.99
4	0.89	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99
5	0.86	1.00	0.98	1.00	1.00	0.99
6	0.92	0.99	0.98	1.00	1.00	0.99
7	0.87	0.99	0.97	1.00	1.00	0.99
8	0.89	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99
Média	0.86	0.93	0.96	0.99	0.99	0.99

Tabela 5.7: Coeficiente de correlação para as parcelas quadradas, calculado a partir da imagem ML SPOT.

Tamanho da parcela (unidades)	Caso I	Caso II
1	0.92	0.96
2	0.93	0.99
3	0.99	0.99
4	1.00	1.00
5	1.00	1.00
6	0.99	1.00
7	1.00	1.00
8	1.00	1.00
Média	0.98	0.99

Tabela 5.8: Coeficiente de correlação para as parcelas quadradas, calculado a partir da imagem ML Landsat.

Tamanho da parcela (unidades)	Caso I	Caso II
1	0.94	0.97
2	0.94	0.98
3	0.99	0.99
4	1.00	1.00
5	1.00	1.00
6	1.00	1.00
7	1.00	1.00
8	1.00	1.00
Média	0.98	0.99

Do estudo dos dados das tabelas anteriores constata-se que à medida que o tamanho da parcela aumenta, os valores do coeficiente de correlação tendem também a aumentar.

No caso SPOT, os métodos de fusão com maior correlação são o Brovey, o IHS hexacónico e o Wavelet IHS, todos com valor médio de 0.99 (tabela 5.5). Para o caso Landsat, os melhores métodos são o PCA, o Wavelet IHS e o Wavelet banda única, todos com valor médio de 0,99 (tabela 5.6).

Os dados obtidos da imagem ML revelam que o caso II apresenta valores geralmente melhores, quer em relação ao caso I, quer em relação às imagens fundidas. Contudo, as diferenças são mínimas.

As conclusões resultantes da análise do coeficiente de correlação são consistentes com as obtidas pelo parâmetro δ , verificando-se, no entanto, uma melhoria do método Wavelet banda única em relação ao método IHS cilíndrico (tabela 5.6) no caso Landsat.

Os resultados obtidos para o parâmetro RMSE (raiz quadrada do erro médio) podem ser analisados nas tabelas 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12. A sua análise revela que os valores de RMSE tendem a diminuir com o aumento do tamanho da parcela.

Os melhores métodos de fusão são o Brovey (7.86), o Wavelet IHS (7.90) e o IHS hexacónico (8.63) para o SPOT (tabela 5.9) e, o PCA (16.17), o Wavelet IHS (16.19) e o Wavelet banda única (18.58) para o Landsat (tabela 5.10). O melhor valor médio de RMSE é obtido para o método de Brovey no SPOT e para o método PCA no Landsat. Pela análise das tabelas 5.9 e 5.10 verifica-se que os melhores métodos de fusão no caso SPOT são os menos satisfatórios no caso Landsat, e vice-versa, à excepção do Wavelet IHS.

Atendendo aos resultados obtidos da imagem ML (tabelas 5.11 e 5.12) verifica-se que o caso II apresenta melhores resultados na maioria das parcelas.

Numa análise global, para ambas as imagens de teste, os melhores resultados de RMSE são obtidos a partir de ML, embora as diferenças sejam mínimas relativamente aos obtidos pelos melhores métodos de fusão.

Tabela 5.9: RMSE para as parcelas quadradas e para os seis métodos de fusão, usando a imagem de teste SPOT.

Tamanho da parcela (unidades)	Brovey	IHS Cilíndrico	IHS Hexacónico	PCA	Wavelet IHS	Wavelet Banda única
1	17.47	35.92	16.88	34.86	17.12	38.49
2	18.83	40.19	17.67	35.00	17.94	39.34
3	9.05	29.27	8.12	29.87	8.98	19.50
4	1.79	25.29	5.12	24.74	3.20	7.96
5	3.49	25.22	4.93	27.19	3.10	12.37
6	6.55	30.02	5.99	27.86	6.35	19.23
7	3.75	26.52	4.93	27.02	3.49	12.80
8	1.96	25.91	5.37	25.89	2.99	8.20
Média	7.86	29.79	8.63	29.05	7.90	19.74

Tabela 5.10: RMSE para as parcelas quadradas e para os seis métodos de fusão, usando a imagem de teste Landsat.

Tamanho da parcela (unidades)	Brovey	IHS Cilíndrico	IHS Hexacónico	PCA	Wavelet IHS	Wavelet Banda única
1	139.25	42.55	71.54	28.36	29.05	30.77
2	112.75	39.82	61.87	24.88	26.39	27.26
3	125.17	20.16	62.69	15.86	15.43	16.69
4	127.57	8.35	60.21	9.70	10.24	13.19
5	132.27	12.11	60.95	13.51	13.05	15.78
6	121.11	15.05	58.76	13.46	12.95	16.89
7	128.51	11.40	59.87	13.46	11.92	14.60
8	127.18	7.84	60.04	10.12	10.49	13.48
Média	126.73	19.66	61.99	16.17	16.19	18.58

Tabela 5.11: RMSE para as parcelas quadradas, calculado a partir da imagem ML SPOT.

Tamanho da parcela (unidades)	Caso I	Caso II
1	19.87	17.21
2	23.69	18.74
3	8.62	8.87
4	1.79	1.79
5	3.49	3.39
6	8.00	6.45
7	4.60	3.39
8	1.96	1.96
Média	9.00	7.73

Tabela 5.12: RMSE para as parcelas quadradas, calculado a partir da imagem ML Landsat.

Tamanho da parcela (unidades)	Caso I	Caso II
1	33.22	25.55
2	27.82	23.87
3	9.60	11.65
4	5.88	5.88
5	11.20	9.12
6	10.46	9.70
7	6.09	7.88
8	5.66	5.66
Média	13.74	12.41

No caso da distância euclidiana média (DE), os resultados obtidos estão apresentados nas tabelas 5.13 a 5.16. Da análise das tabelas constata-se que à medida que o tamanho da parcela aumenta, o valor de DE tende a diminuir.

Para a imagem de teste SPOT, os métodos de fusão com melhores resultados são o Brovey, o IHS hexacónico e o Wavelet IHS. Em média, o melhor método é o Wavelet IHS com um valor de 1.72. No caso Landsat, o Wavelet IHS continua a ser o melhor em termos médios, no entanto o valor é relativamente pior do que o obtido para o caso SPOT. O método de Brovey apesar de apresentar um bom resultado no caso SPOT, é um método muito pouco satisfatório no caso Landsat.

Nos resultados obtidos a partir de ML, constata-se que o caso II apresenta melhores valores de DE que o caso I, sendo, em média, melhor que este cerca de duas décimas. O resultado médio do caso II é melhor que o obtido pelo melhor método de fusão no caso Landsat, mas igual ao obtido pelo melhor método de fusão no caso SPOT.

Tabela 5.13: DE para as parcelas quadradas e para os seis métodos de fusão, usando a imagem de teste SPOT.

Tamanho da parcela (unidades)	Brovey	IHS Cilíndrico	IHS Hexacónico	PCA	Wavelet IHS	Wavelet Banda única
1	3.49	7.18	3.38	6.97	3.42	7.70
2	3.77	8.04	3.53	7.00	3.59	7.87
3	1.81	5.85	1.62	5.97	1.80	3.90
4	1.81	5.85	1.62	5.97	1.80	3.90
5	0.70	5.04	0.99	5.44	0.62	2.47
6	1.31	6.00	1.20	5.57	1.27	3.85
7	0.75	5.30	0.99	5.40	0.70	2.56
8	0.39	5.18	1.07	5.18	0.60	1.64
Média	1.75	6.06	1.80	5.94	1.72	4.24

Tabela 5.14: DE para as parcelas quadradas e para os seis métodos de fusão, usando a imagem de teste Landsat.

Tamanho da parcela (unidades)	Brovey	IHS Cilíndrico	IHS Hexacónico	PCA	Wavelet IHS	Wavelet Banda única
1	27.85	8.51	14.31	5.67	5.81	6.15
2	22.55	7.96	12.37	4.98	5.28	5.45
3	25.03	4.03	12.54	3.17	3.09	3.34
4	25.03	4.03	12.54	3.17	3.09	3.34
5	26.45	2.42	12.19	2.70	2.61	3.16
6	24.22	3.01	11.75	2.69	2.59	3.38
7	25.70	2.28	11.97	2.69	2.38	2.92
8	25.44	1.57	12.01	2.02	2.10	2.70
Média	25.29	4.23	12.46	3.39	3.37	3.80

Tabela 5.15: DE para as parcelas quadradas, calculada a partir da imagem ML SPOT.

Tamanho da parcela (unidades)	Caso I	Caso II
1	3.97	3.44
2	4.74	3.75
3	1.72	1.77
4	1.72	1.77
5	0.70	0.68
6	1.60	1.29
7	0.92	0.68
8	0.39	0.39
Média	1.97	1.72

Tabela 5.16: DE para as parcelas quadradas, calculada a partir da imagem ML Landsat.

Tamanho da parcela (unidades)	Caso I	Caso II
1	6.64	5.11
2	5.56	4.77
3	1.92	2.33
4	1.92	2.33
5	2.24	1.82
6	2.09	1.94
7	1.22	1.58
8	1.13	1.13
Média	2.84	2.63

6.

Interface Gráfica

As imagens sintéticas, apresentadas no capítulo 3, foram criadas a partir de programas desenvolvidos em linguagem C. Através desses programas é possível gerar imagens sintéticas com os parâmetros escala (s), tamanho da parcela unitária (u), repetição (r) e classes (c) pretendidos. No entanto, o facto de as aplicações correrem em ambiente DOS torna o processo de criação das imagens moroso e complicado, principalmente se for necessário repetir o processo inúmeras vezes.

Uma vez que se pretende divulgar o sistema de testes de fusão (e segmentação) usando este tipo de imagens sintéticas é necessário que o software de produção de imagens sintéticas seja robusto e de fácil utilização. Este objectivo pode ser atingido através do desenvolvimento de uma interface que faça a ligação entre o utilizador e os programas em C. Depois de avaliadas as diferentes soluções possíveis para implementação da interface gráfica, optou-se pela linguagem de programação C#, utilizando o software de desenvolvimento Visual Studio 2005. A escolha deve-se ao facto deste software ser muito intuitivo e permitir uma rápida aprendizagem da linguagem de programação C# através da literatura de ajuda disponibilizada com o sistema e on-line no site <http://msdn2.microsoft.com/>.

A aplicação computacional deverá permitir ao utilizador efectuar a criação da imagem base, das bandas da imagem sintética multiespectral (MF), da imagem sintética pancromática (PAN), das bandas da imagem sintética multiespectral reduzida (ML) e uma imagem de objectos (imagem base com uma etiqueta distinta para cada parcela). Assim, poderão ser efectuados testes de fusão, ou mesmo de segmentação, usando as imagens sintéticas criadas de acordo com as especificações do utilizador. Uma vez que o objectivo é permitir um uso livre e alargado desta ferramenta, a aplicação computacional foi desenvolvida em inglês.

Neste capítulo é apresentada a aplicação desenvolvida, sendo descritas as suas facilidades e ilustrado o seu funcionamento.

6.1 Funcionamento

Foi desenvolvida uma aplicação computacional em Visual Studio 2005, usando a linguagem de programação C#, funcionando como uma interface entre o utilizador e os programas inicialmente desenvolvidos em C (capítulo 3). Houve no entanto necessidade de modificar alguns programas para um bom funcionamento em C#.

A figura 6.1 mostra a janela inicial da aplicação, a qual permite executar as quatro etapas da criação das imagens sintéticas: *Base Image* (para criação da imagem base), *Multi-spectral* (para criação das bandas da imagem MF), *Fusion Test* (para criação da imagem PAN e bandas da imagem ML) e *Segmentation Test* (para criação da imagem de objectos).

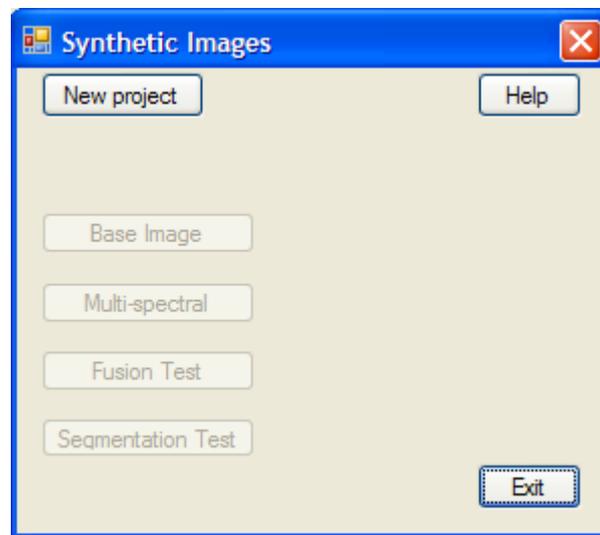


Figura 6.1: Painel principal da aplicação desenvolvida, no início de uma nova sessão.

A execução de cada uma destas quatro etapas está dependente da execução prévia de etapas anteriores. Por este motivo, os botões associados a cada etapa só ficam activos se os passos anteriores forem completados correctamente (figura 6.2). Assim que uma etapa é finalizada não pode voltar a ser executada (ficando o botão respectivo desactivado) excepto se o utilizador iniciar um novo projecto.

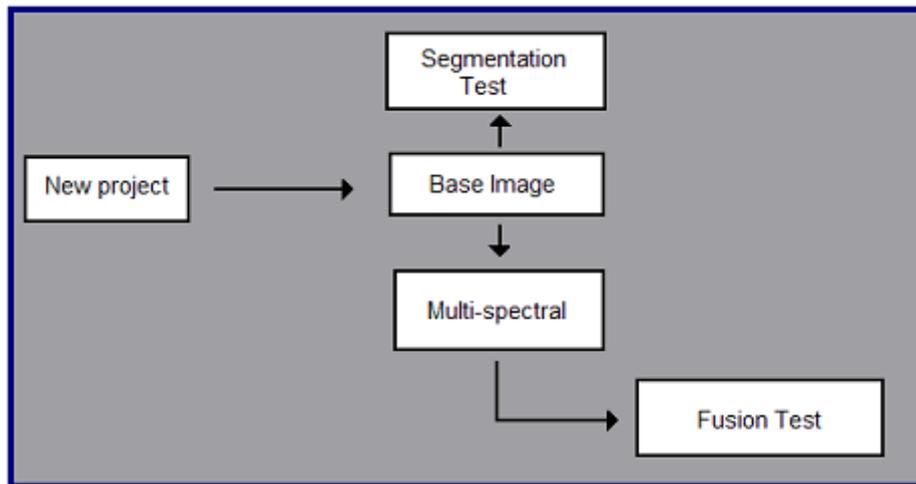


Figura 6.2: Apresentação da relação de dependência existente entre as várias etapas.

Ao iniciar a aplicação, apenas três botões estão activos na janela inicial: *Help*, *Exit* e *New Project* (figura 6.1).

A função *Exit* permite ao utilizador terminar a aplicação.

A função *Help* permite ao utilizador obter instruções sobre a interface. Ao ser seleccionada esta função, é aberto um documento de texto (figura 6.3), com as instruções do funcionamento da aplicação. A versão completa do texto é apresentada no Apêndice 1.

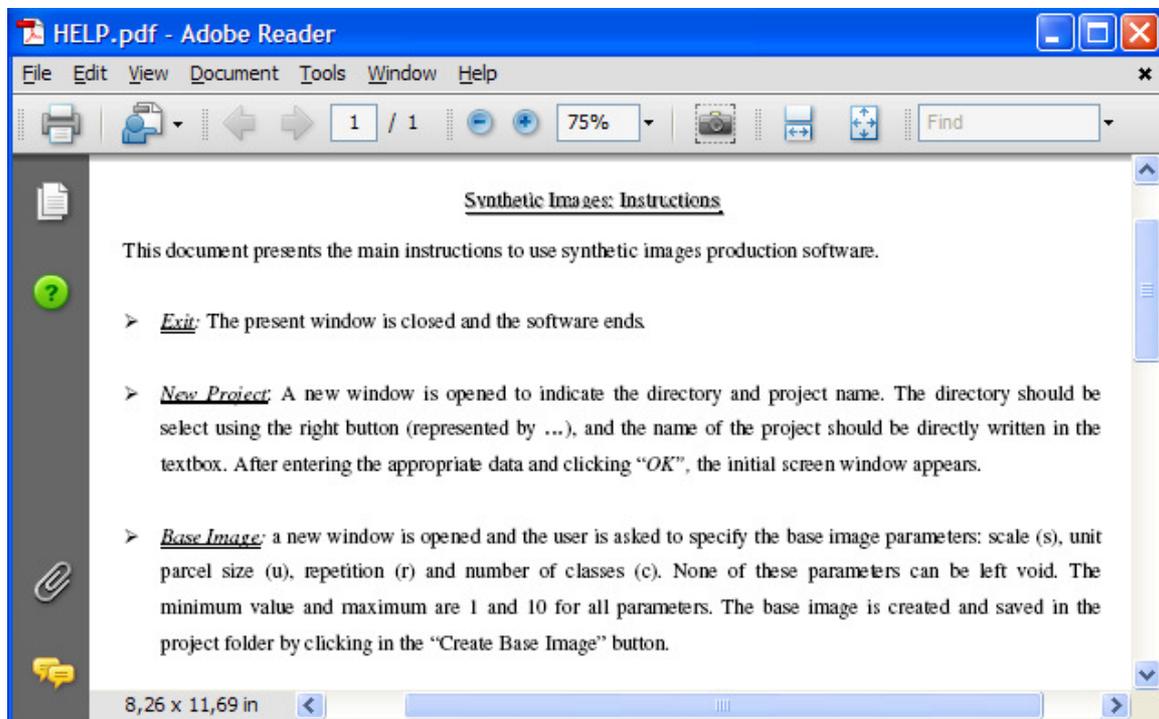


Figura 6.3: Janela de instruções de utilização da aplicação, acessíveis através do botão *Help*.

(Texto completo no Apêndice 1).

A função *New Project* deve ser escolhida sempre que o utilizador pretender iniciar um novo projecto. Ao ser pressionado o botão é aberta uma nova janela (figura 6.4) na qual o utilizador deve seleccionar o directório (usando o botão lateral) e escrever o nome do projecto. É no directório + nome indicado pelo utilizador que será guardada toda a informação do projecto (imagens sintéticas e um ficheiro de texto com todos os dados introduzidos ao longo do projecto).

Nem o directório nem o nome poderão ser vazios. Caso esta situação se verifique, a aplicação não avança, e é exibida uma mensagem de erro ao utilizador (figura 6.5).

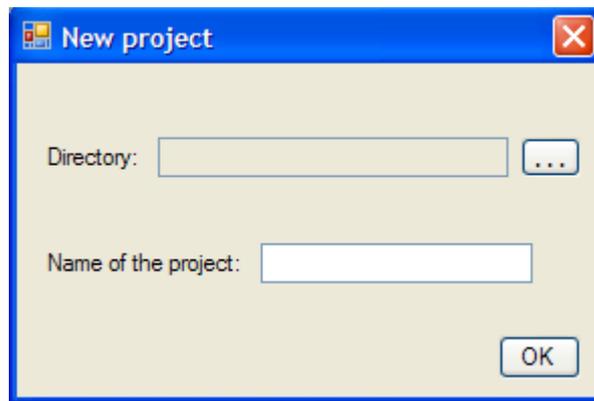


Figura 6.4: Janela de inicialização de um novo projecto.

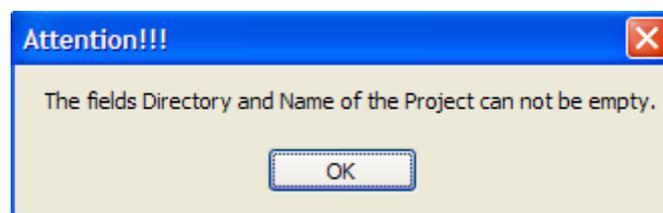


Figura 6.5: Mensagem de erro caso algum dos campos da janela “New project” não seja preenchido.

Uma vez introduzidos os dados correctamente, o utilizador poderá prosseguir seleccionando a opção *OK*. A janela *New Project* fecha-se e a janela inicial reaparece com a informação referente à localização do novo projecto (directório escolhido). A figura 6.6 apresenta um exemplo de um directório e nome escolhidos (à esquerda) e janela inicial actualizada com estes dados (à direita). Como se pode verificar, o botão *Base Image* já está activo, podendo assim ser seleccionado para se proceder à criação da imagem base.

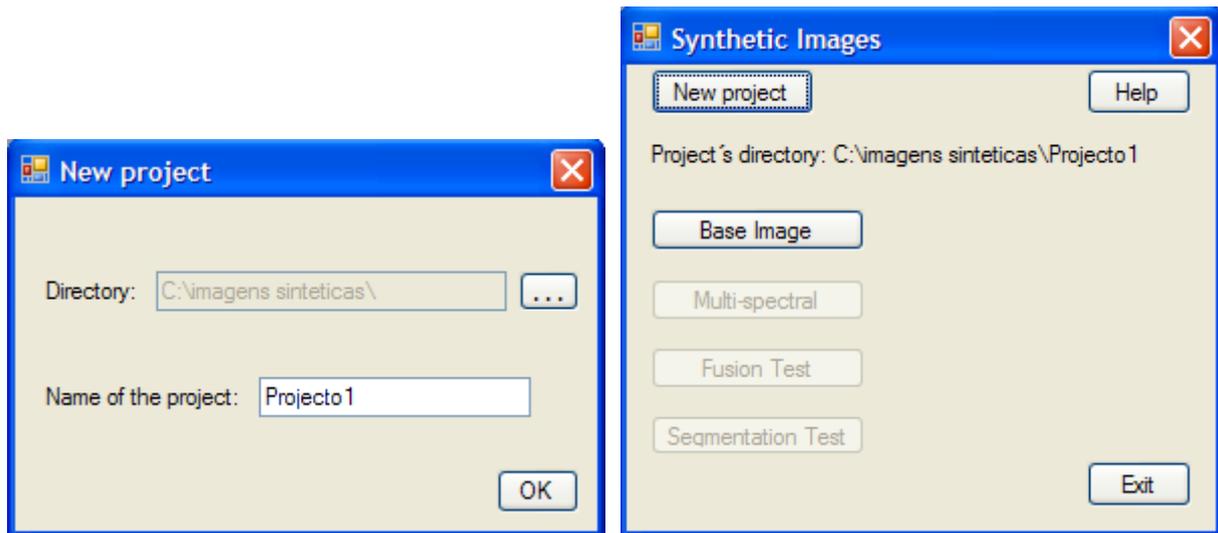


Figura 6.6: Exemplo de identificação de novo projecto (esquerda) e painel inicial da aplicação após a selecção de um novo projecto (direita).

6.2 Imagem Base

A opção *Base Image* permite ao utilizador criar a imagem base pretendida. Ao seleccionar esta opção é aberta uma nova janela (figura 6.7), onde deverão ser introduzidos os quatro parâmetros que caracterizam a imagem base: *Scale* (escala, s), *Unit parcel size* (tamanho da parcela unitária, u), *Repetition* (repetição, r) e *Number of classes* (total de classes, c). A descrição do significado destes parâmetros foi feita no capítulo 3. Estes quatro parâmetros devem ser representados por números, e por isso as caixas de texto reservadas a parâmetros numéricos, em toda a aplicação computacional desenvolvida, estão definidas de forma a não ser possível escrever letras.

Os parâmetros s , u , r , c admitem como valor mínimo 1 e máximo 10. No caso de o utilizador introduzir um valor inferior a 1 ou superior a 10 aparecerá uma mensagem indicando que o valor escolhido não é válido, e passará automaticamente para 1 ou para 10 (figura 6.8). Os parâmetros s , u , r , c deverão ser valores inteiros, pelo que se tal não se verificar a mensagem de erro da figura 6.9 aparece no ecrã e o valor inserido é apagado.

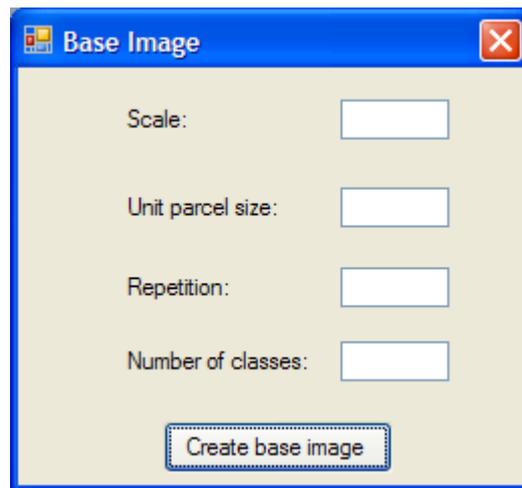


Figura 6.7: Janela de selecção de parâmetros para a imagem base.

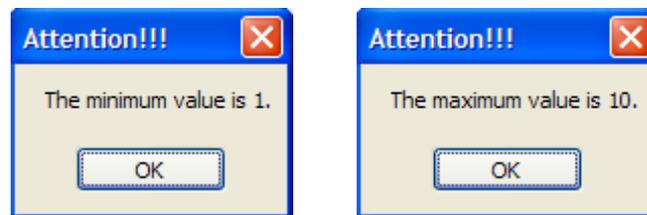


Figura 6.8: Mensagem de erro se for introduzido um valor inferior a 1 (esquerda) ou superior a 10 (direita) para os parâmetros da imagem base.

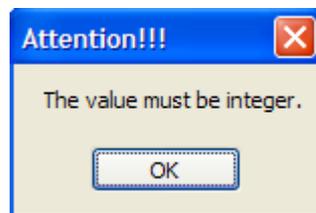


Figura 6.9: Mensagem de erro caso o valor introduzido, para os parâmetros da imagem base, não seja um inteiro.

A criação da imagem base só é possível quando os quatro parâmetros *s*, *u*, *r*, *c* forem todos válidos. Assim, sempre que o utilizador seleccionar a opção *Create base image* e algum dos parâmetros for vazio, a mensagem da figura 6.10 aparecerá no ecrã.



Figura 6.10: Mensagem de erro se algum dos parâmetros da imagem base não estiver preenchido.

Após a introdução correcta de todos os parâmetros, é possível criar a imagem base, seleccionando a opção *Create base image*.

Uma vez gerada a imagem base é criado um ficheiro `base_image.raw` no directório seleccionado inicialmente pelo utilizador. Como a imagem base tem formato raw, só é possível visualizá-la usando software adequado (por exemplo PCI Geomatics). De modo a permitir uma pré-visualização da imagem raw, implementou-se uma função para criar também uma versão da imagem base em formato bmp. Esta imagem surge automaticamente no ecrã, bem como uma janela permitindo ao utilizador indicar o directório onde pretende guardá-la.

Para uma melhor visualização da imagem bmp foi criada uma tabela de cor RGB. Assim, cada pixel da imagem terá componente vermelha fixada no valor 150, componente azul fixada no valor 120, e componente verde com o valor do pixel da imagem raw, escalonado para valores compreendidos entre 0 a 255.

A figura 6.11 apresenta um exemplo de uma imagem base em formato bmp criada com os parâmetros $s=8$, $u=3$, $r=5$ e $c=6$.

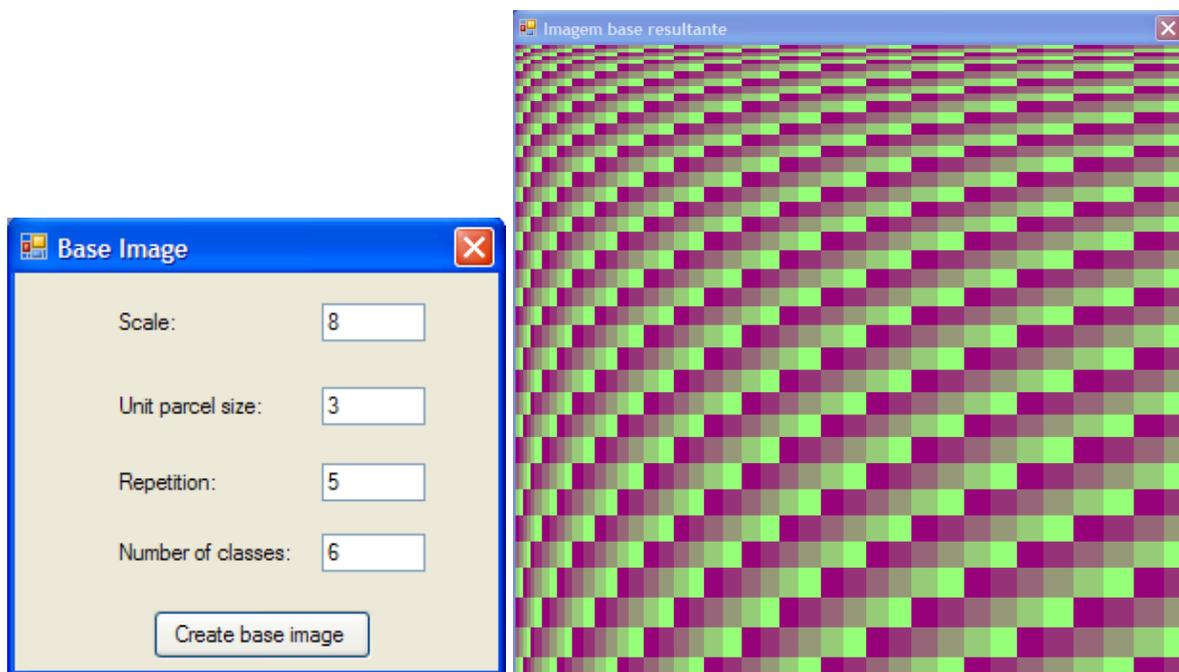


Figura 6.11: Exemplo de criação de imagem base.

Para além da imagem base será gravado na pasta do projecto, um ficheiro de texto (`Info.txt`), que contém todos os dados do projecto. Nesta primeira fase, este ficheiro de texto conterá informação sobre nome do projecto, parâmetros s , u , r , c e número de linhas e colunas da imagem base (figura 6.12).

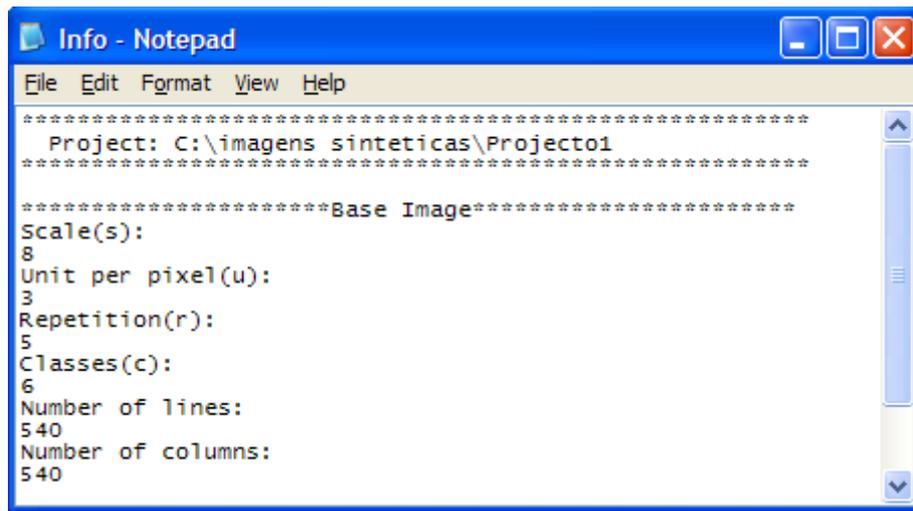


Figura 6.12: Exemplo do ficheiro de texto (Info.txt) contendo informação sobre a imagem base gerada.

Nesta fase, o utilizador pode optar ou por gravar a imagem ou por fechar a janela correspondente. Qualquer que seja a opção do utilizador, a janela anterior fecha-se e a janela inicial reaparece. Os parâmetros da imagem base passam a ser visíveis ao lado do botão *Base Image* do painel principal da aplicação (figura 6.13).

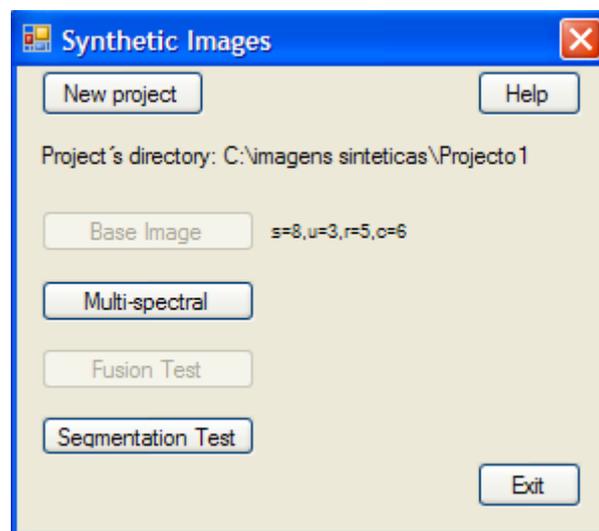


Figura 6.13: Painel principal após a criação da imagem base.

Uma vez criada a imagem base torna-se possível criar as bandas da imagem multiespectral sintética e a imagem de objectos. Assim, as opções *Multi-spectral* e *Segmentation Test* passam a estar activas, e a opção *Base Image* é desactivada (ver figura 6.13).

6.3 Imagem de objectos

A imagem de objectos representa a imagem base com uma etiqueta distinta atribuída a cada parcela. A primeira parcela (apresentada no CSE da imagem base) terá valor 1 na imagem de objectos, enquanto que a última parcela (CID) terá um valor igual ao número total de parcelas, ou seja, $(s \times r)^2$. Por exemplo, no caso da imagem base apresentada na figura 6.11, com $s=8$ e $r=5$, o número total de objectos é 1600.

A criação da imagem de objectos não necessita que o utilizador indique quaisquer parâmetros. Ao seleccionar a opção *Segmentation Test* a aplicação lê a imagem base previamente criada e a partir dela gera uma imagem de 16-bits, denominada *BaseImage_objects.raw*, que é guardada no mesmo directório da imagem base.

Uma vez criada a imagem de objectos aparece no painel principal uma indicação, como está ilustrado na figura 6.14. A partir deste momento a opção *Segmentation Test* fica desactivada uma vez que já foi criada a imagem de objectos (figura 6.14).

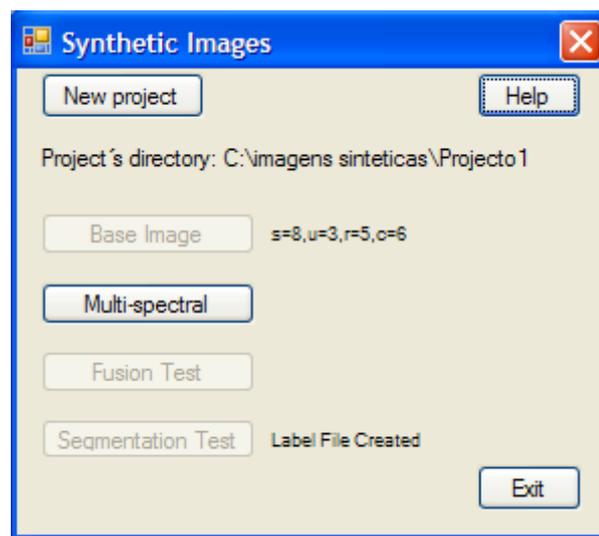


Figura 6.14: Painel principal com indicação de que a imagem de objectos foi criada.

6.4 Criação da imagem multiespectral (MF)

Para a aplicação poder criar uma imagem multiespectral (MF) a partir da imagem base é necessário indicar os dados relativos à imagem multiespectral de satélite que se pretende usar como referência. Os dados necessários são: número de bandas, tamanho da imagem (número

de linhas e colunas), localização dos ficheiros para cada uma das bandas de satélite e limites das áreas de treino.

Ao seleccionar a opção *Multi-spectral* surge uma nova janela (figura 6.15) que permite seleccionar um de dois modos para indicar os dados da imagem de satélite. A opção *Create a new Reference Satellite Image* permite estabelecer uma nova imagem de referência. Os dados desta imagem de referência são guardados num ficheiro de texto que poderá ser usado em futuros projectos. Assim, se existir uma imagem de referência definida previamente, e cujos dados relevantes foram guardados num ficheiro de texto, é possível usá-la seleccionando a opção *Open a Reference satellite Image*.

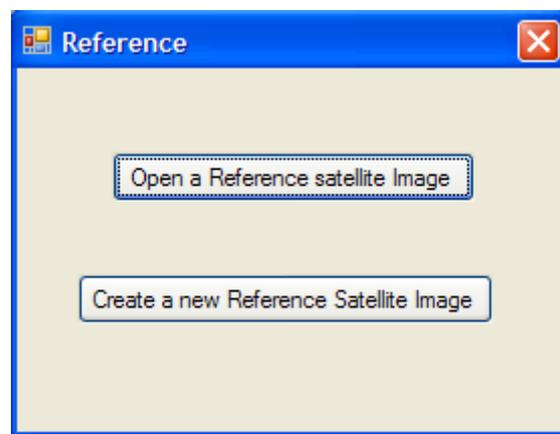


Figura 6.15: Janela com opções relativas à definição da imagem de referência.

6.4.1 Criar uma nova imagem de referência

Seleccionando a opção *Create a new Reference Satellite Image* no painel da figura 6.15, aparece no ecrã uma nova janela (figura 6.16) onde deve ser introduzido o número de bandas, linhas e colunas da imagem de satélite de referência que se pretende utilizar.

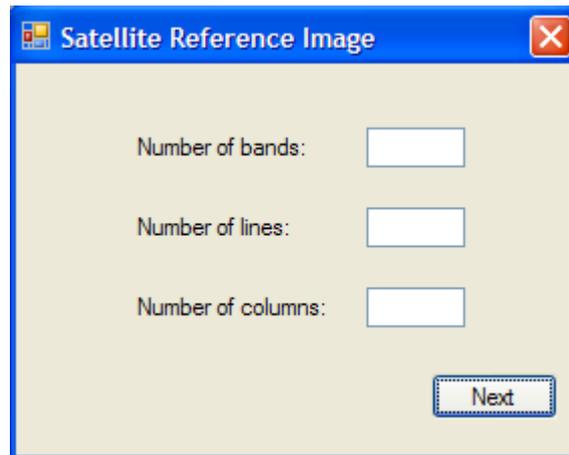


Figura 6.16: Janela para indicação de parâmetros relativos à imagem multiespectral de satélite usada como referência.

O parâmetro número de bandas (Number of bands) está limitado aos valores 1,2,3. Assim, sempre que forem introduzidos outros valores aparecerá a mensagem da figura 6.17 (esquerda e centro) e o limite mais próximo é automaticamente atribuído a este parâmetro. O valor inserido deve ser inteiro, caso contrário, o valor é automaticamente apagado e aparecerá no ecrã a mensagem da figura 6.17 (direita).

O número de linhas e colunas terão como valor mínimo 1 e valor máximo 2050. Esta limitação foi imposta por motivos de tempo de execução e capacidade de memória. Se forem introduzidos valores fora deste intervalo de valores, aparecerá a mensagem da figura 6.18 (esquerda e centro) e o limite mais próximo é automaticamente atribuído ao parâmetro em causa. Tal como no parâmetro anterior, estes parâmetros devem ser inteiros. Se tal não se verificar aparecerá ao utilizador a mensagem da figura 6.18 (direita) e o valor é automaticamente apagado.

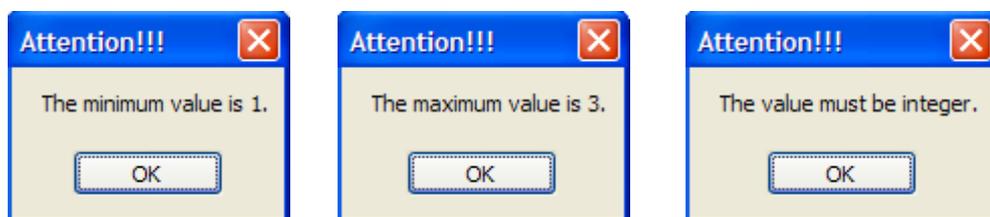


Figura 6.17: Mensagens de erro caso seja introduzido um valor inferior a 1 (esquerda) ou superior a 3 (centro), para o número de bandas, ou um valor não inteiro (direita).



Figura 6.18: Mensagens de erro caso seja introduzido um valor inferior a 1 (esquerda) ou superior a 2050 (centro), para o número de linhas/columnas, ou um valor não inteiro (direita).

Nenhum destes campos pode estar vazio. Se tal acontecer, ao carregar no botão *Next* (ver figura 6.16), a aplicação não avança exibindo a mensagem apresentada na figura 6.10.

Se todos os parâmetros tiverem valores válidos, ao premir o botão *Next* é aberta uma nova janela pedindo ao utilizador que indique a localização dos ficheiros correspondentes a cada uma das bandas da imagem de satélite de referência. Na figura 6.19 é apresentado um exemplo, onde a selecção de 3 bandas na janela da figura 6.16 faz com que a janela “Satellite Bands” peça a localização das 3 bandas.

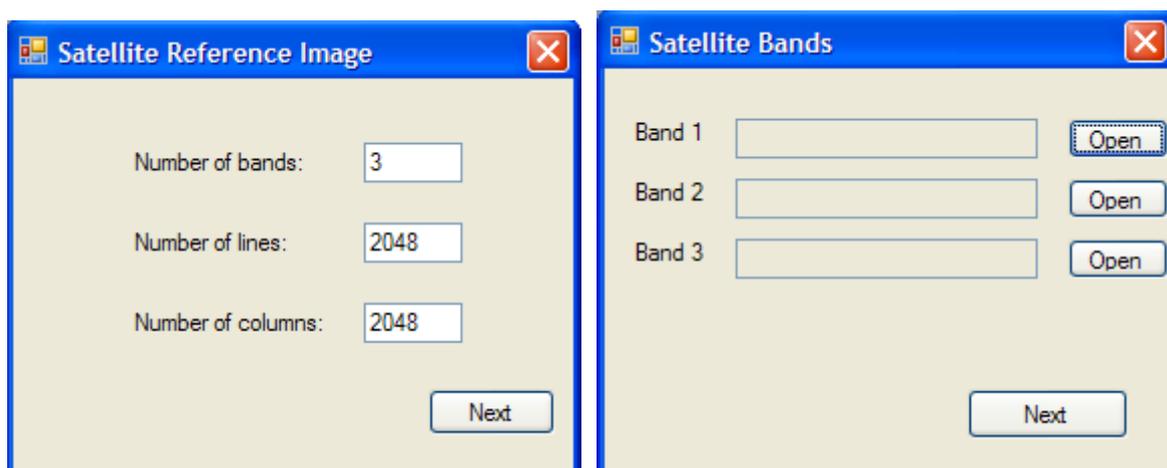


Figura 6.19: Exemplo da selecção de uma imagem de referência (esquerda) e janela para indicação da localização dos ficheiros para cada banda (direita).

A opção *Open* permite procurar o directório em que se encontra o ficheiro associado a cada banda. A localização será preenchida na respectiva caixa de texto. Nenhuma das caixas de texto pode ser deixada por preencher, e os caminhos devem estar correctos. Se tal não se verificar, não é possível avançar com o programa e a mensagem de erro da figura 6.20 é mostrada ao utilizador.

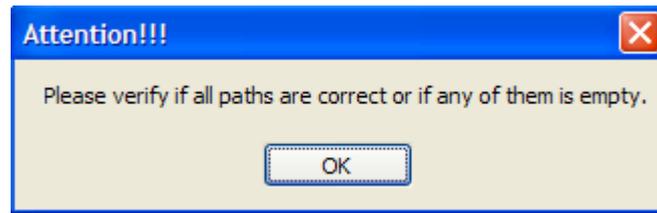


Figura 6.20: Mensagem de erro apresentada se a localização de algum ficheiro estiver incorrecta ou vazia.

Não havendo problemas com a localização dos ficheiros, ao premir o botão *Next* o utilizador avança para o próximo passo, onde são pedidas as localizações das áreas de treino (associadas a diferentes ocupações de solo) através da abertura de uma nova janela (figura 6.21). A localização destas áreas é definida por quatro valores ($X_{minimum}$, $X_{maximum}$, $Y_{minimum}$ e $Y_{maximum}$) que correspondem a um rectângulo na imagem de referência. Os valores $X_{minimum}$ e $Y_{minimum}$ representam as coordenadas do CSE da classe e os valores $X_{maximum}$ e $Y_{maximum}$ representam as coordenadas do CID da área de treino. Os limites deverão ser valores inteiros, e como tal, sempre que um valor não inteiro seja introduzido o programa mostra uma mensagem de erro (figura 6.9).

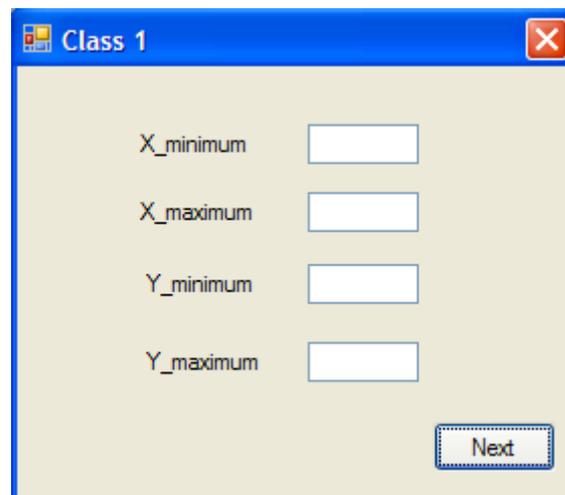


Figura 6.21: Janela para identificação da área de treino da classe 1.

Os valores de $X_{minimum}$ e $X_{maximum}$ e de $Y_{minimum}$ e $Y_{maximum}$ não podem ser iguais. Se isso acontecer é mostrada uma mensagem de erro (figura 6.22, à esquerda). Se o valor de $X_{minimum}$ ou de $Y_{minimum}$ for inferior a 1 será automaticamente igualado a 1 e a mensagem da figura 6.22 (centro) surge no ecrã. O valor de $X_{maximum}/Y_{maximum}$ não pode ser superior ao número de colunas/linhas da imagem de referência. Se tal acontecer, aparecerá uma mensagem de erro (figura 6.22 à direita) e o valor será automaticamente igualado ao valor máximo permitido (número de colunas/linhas da imagem de referência).

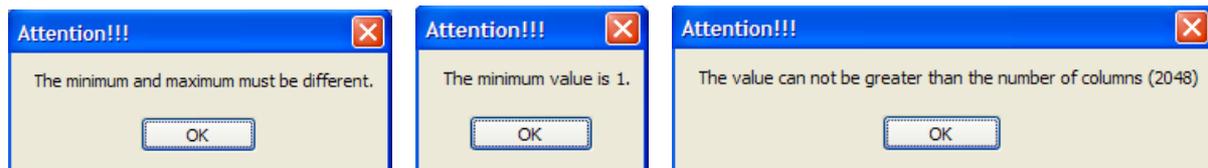


Figura 6.22: Mensagens de erro apresentadas se os valores mínimo e máximo forem iguais (esquerda), se forem inferiores a 1 (centro), ou maiores do que o número de linhas/colunas da imagem de referência (direita).

Só é possível passar ao passo seguinte se os valores introduzidos cumprirem com as condições mencionadas. Se algum campo estiver vazio, aparecerá no ecrã a mensagem de erro da figura 6.10.

A janela para identificação das áreas de treino (figura 6.21) aparecerá tantas vezes quanto o número de classes definido pelo utilizador para a imagem base. As janelas serão exactamente iguais, à excepção da identificação da classe (de Class 1 passará para Class 2 e assim sucessivamente). Em todas as janelas os valores introduzidos terão de cumprir com os requisitos atrás mencionados.

Nesta fase, será gravado no mesmo directório do projecto um ficheiro de texto, intitulado Reference Satellite Image (figura 6.23), com os dados referentes à imagem de satélite de referência criada.

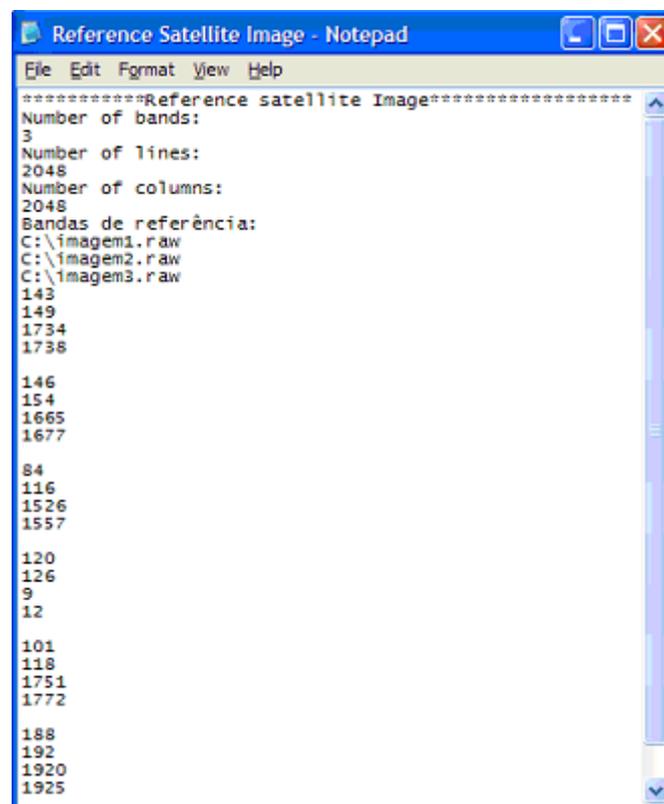


Figura 6.23: Exemplo de ficheiro de texto “Reference Satellite Image.txt”, com informação relativa à imagem de referência e classes identificadas.

6.4.2 Seleccionar uma imagem de referência existente

A outra opção no painel de definição da imagem de referência (figura 6.15) é *Open a Reference satellite Image*, que permite utilizar uma imagem de referência criada anteriormente. A escolha desta opção é consumada através da selecção de um ficheiro de texto onde está registada a informação relativa à imagem e classes de referência. O programa verifica se o número de classes aí definidas é igual ao número de classes da imagem base. Se não for igual aparecerá a mensagem de erro da figura 6.24.

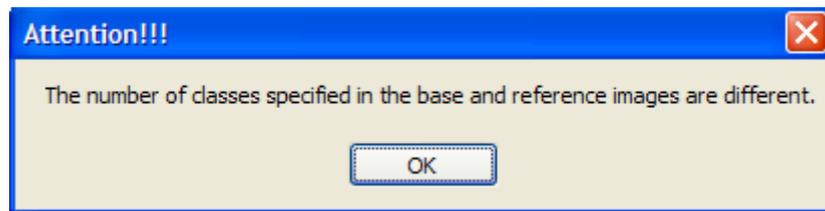
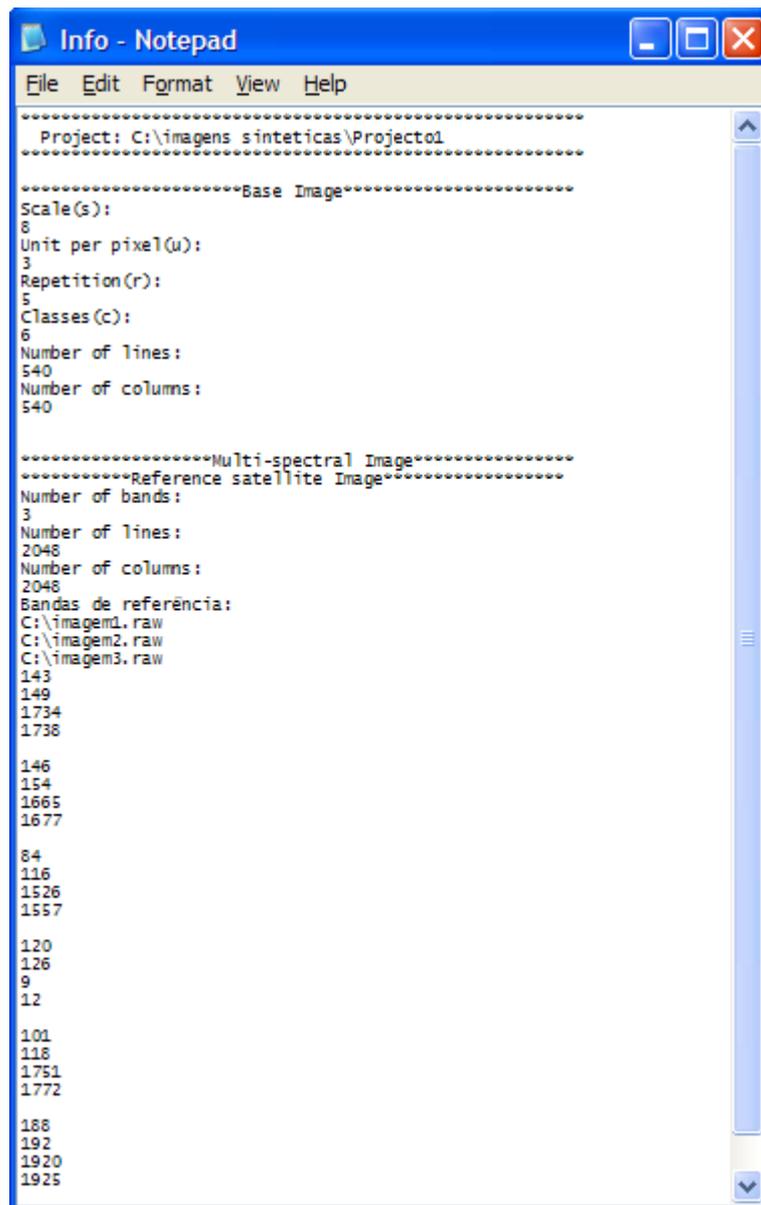


Figura 6.24: Mensagem de erro se o número de classes da imagem de referência escolhida for diferente do número de classes da imagem base.

6.4.3 Criação da imagem

A informação proveniente das secções 6.4.1 e 6.4.2 é anexada ao ficheiro de texto já existente Info.txt. Este ficheiro de texto passa assim a ter informação sobre: nome do projecto, parâmetros da imagem base s, u, r e c, número de linhas e colunas da imagem base, número de bandas, linhas e colunas da imagem de satélite de referência, ficheiros imagem de cada banda, e áreas de treino de cada classe. A figura 6.25 mostra um exemplo do ficheiro de texto criado nesta fase de processamento.



```
Info - Notepad
File Edit Format View Help
.....
Project: C:\imagens sinteticas\Project01
.....
*****Base Image*****
Scale(s):
8
Unit per pixel(u):
3
Repetition(r):
5
Classes(c):
6
Number of lines:
540
Number of columns:
540

*****Multi-spectral Image*****
*****Reference satellite Image*****
Number of bands:
3
Number of lines:
2048
Number of columns:
2048
Bandas de referência:
C:\imagem1.raw
143
149
1734
1738

C:\imagem2.raw
146
154
1665
1677

C:\imagem3.raw
84
116
1526
1557
120
126
9
12
101
118
1751
1772
188
192
1920
1925
```

Figura 6.25: Exemplo de ficheiro de texto “Info.txt” contendo a informação relativa à criação da imagem sintética multispectral.

Nesta fase é então possível gerar as bandas da imagem sintética multispectral, que serão guardadas no mesmo directório do projecto. Após a criação destas bandas, aparecerá novamente o painel principal da aplicação, com a descrição do número de bandas, linhas e colunas da imagem de satélite utilizada (figura 6.26). A opção *Multi-spectral* passa a estar desactivada e a opção *Fusion Test* está agora activa.

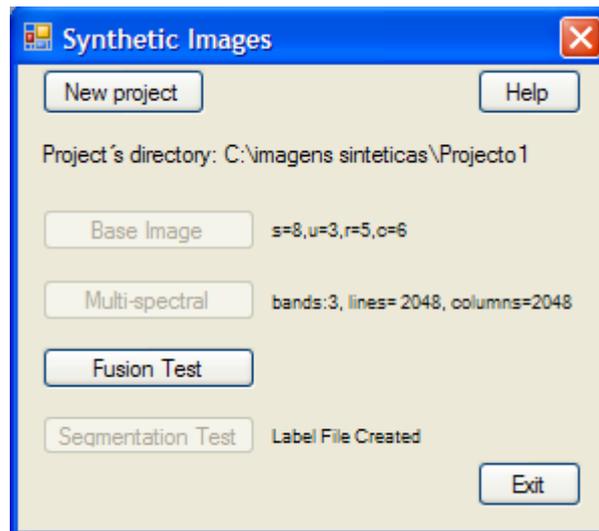


Figura 6.26: Painel principal após a criação da imagem sintética multiespectral.

6.5 Imagens para teste de fusão

A opção *Fusion Test* permite criar duas versões, multiespectral reduzida (ML) e pancromática (PAN), a partir da imagem multiespectral sintética (MF).

A criação destas imagens depende não apenas da imagem sintética multiespectral já criada (MF), mas também das características do sensor que se pretende simular. Numa primeira fase é necessário indicar os dados que permitirão criar a imagem PAN e posteriormente os dados para criar as bandas da imagem ML.

Após seleccionar a opção *Fusion Test* aparece uma janela onde é possível criar um novo sensor ou indicar um já existente (figura 6.27).

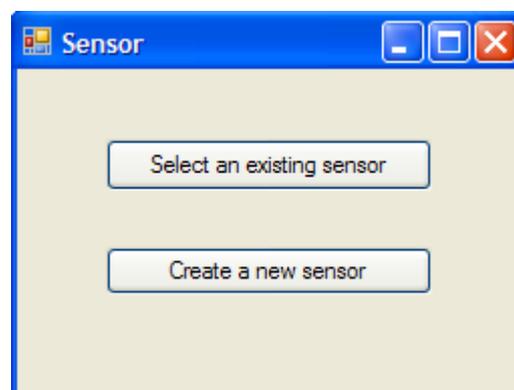


Figura 6.27: Janela para selecção do sensor.

6.5.1 Criar um novo sensor

A opção *Create a new sensor*, permite indicar as características de um sensor que não tenha sido usado previamente. É necessário indicar a relação existente entre as resoluções espaciais das imagens pancromática e multiespectral, e a contribuição relativa de cada banda da imagem multiespectral para a criação da imagem pancromática. A relação entre as bandas multiespectrais e a pancromática é obtida a partir das suas respostas espectrais normalizadas. A soma dos pesos das várias bandas multiespectrais é 1 (normalização).

Ao seleccionar esta opção aparecerá uma nova janela (figura 6.28), onde será necessário identificar o nome do sensor e o peso que a banda 1 tem na construção da pancromática. O peso deverá ser um valor entre 0 e 1. Se tal não acontecer será exibida uma mensagem (figura 6.29 à esquerda) e não será possível avançar até que o valor cumpra com a condição. Se a opção *Next* for seleccionada sem ter sido indicado qualquer valor, o programa apresenta uma mensagem de erro (figura 6.29 à direita) impossibilitando avançar para o passo seguinte.

A janela da figura 6.28 aparecerá tantas vezes quanto o número de bandas da imagem de referência. A janela apresentará o mesmo formato e condições anteriormente descritas, excepto o número da banda e a indicação do sensor (que será retirada).

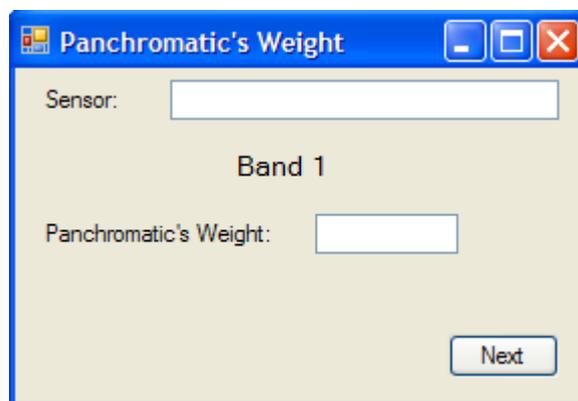


Figura 6.28: Indicação do “peso” que a banda 1 tem na construção da imagem PAN.

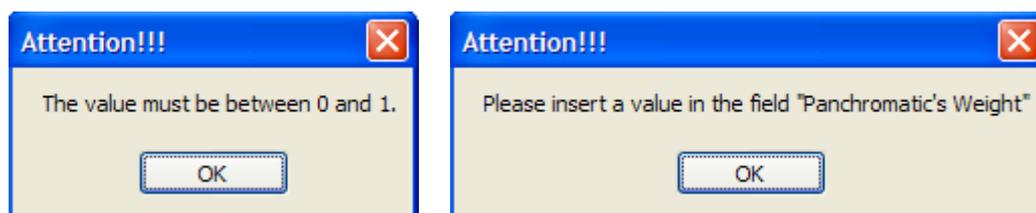


Figura 6.29: Mensagem de erro se o valor introduzido não estiver compreendido entre 0 e 1 (esquerda) ou se não for introduzido qualquer valor (direita).

Quando a janela representar a última banda em causa, o botão *Next* abrirá uma nova janela (figura 6.30) onde deverá ser introduzido o parâmetro *Spatial scale* (quociente entre as resoluções espaciais das imagens multiespectral e pancromática). Este parâmetro define o factor de redução entre a imagem MF e a ML. Este parâmetro não pode ter valor inferior a 1. Se tal acontecer é apresentada a mensagem de erro da figura 6.31 (à esquerda). De igual forma, aparecerá uma mensagem de erro se o valor introduzido não for inteiro (figura 6.31, ao centro) ou se não for introduzido nenhum valor (figura 6.31, à direita).

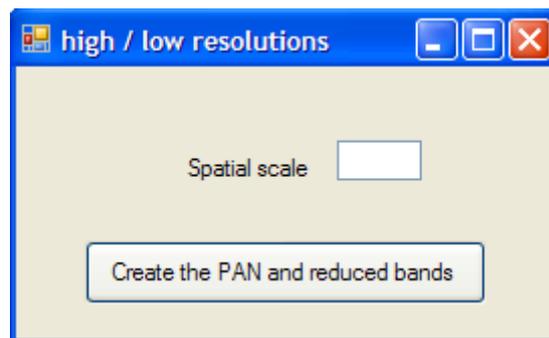


Figura 6.30: Pedido do valor para razão entre a baixa e alta resolução espacial do sensor.

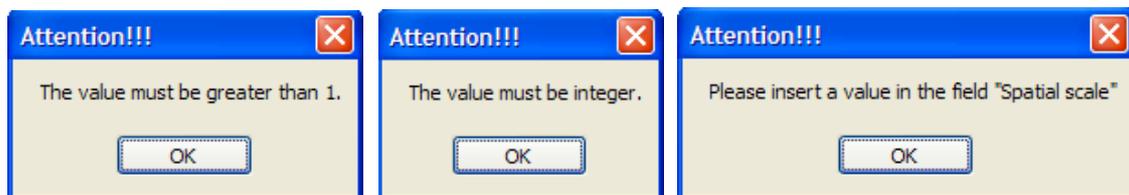
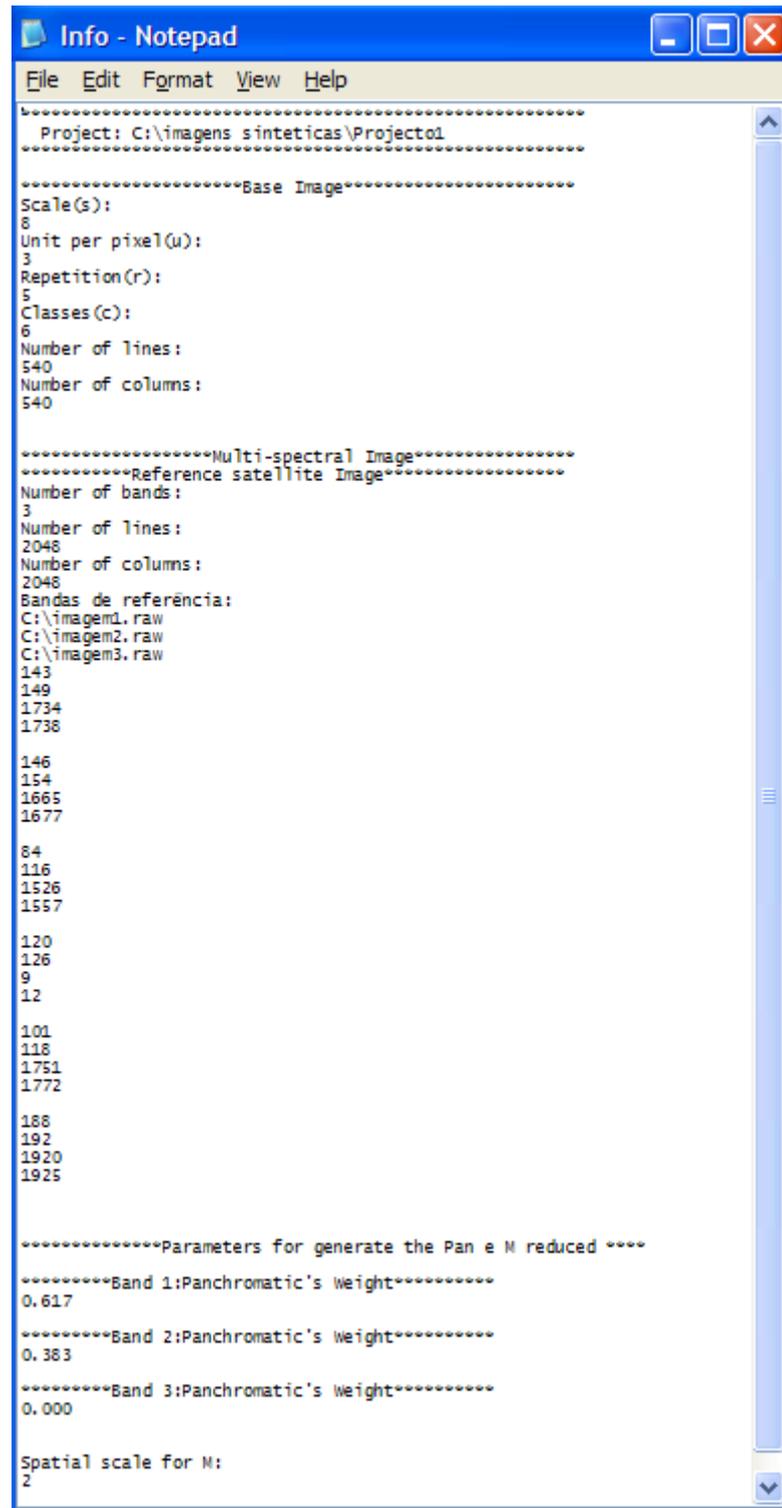


Figura 6.31: Mensagens de erro se o valor introduzido for inferior a 1 (esquerda), se não for inteiro (centro), ou se não for introduzido nenhum valor (direita).

Todos os dados introduzidos pelo utilizador são adicionados ao ficheiro Info.txt (figura 6.32), passando este a ter também informação sobre os pesos relativos de cada banda espectral na construção da imagem PAN e o parâmetro $\frac{l}{h}$, razão entre o tamanho do pixel nas imagens de baixa (l) e alta (h) resolução (por exemplo, $h=10m$, $l=20m$, $\frac{l}{h} = 2$).

Esta informação é também usada para criar um ficheiro de texto com os dados referentes ao sensor, podendo ser futuramente utilizado quando se pretender usar este sensor (figura 6.33). Este ficheiro de texto terá o nome do sensor indicado na janela da figura 6.28.



```
Info - Notepad
File Edit Format View Help
.....
Project: C:\imagens sinteticas\Project01
.....
*****Base Image*****
Scale(s):
8
Unit per pixel(u):
3
Repetition(r):
5
Classes(c):
6
Number of lines:
540
Number of columns:
540
.....
*****Multi-spectral Image*****
*****Reference satellite Image*****
Number of bands:
3
Number of lines:
2048
Number of columns:
2048
Bandas de referència:
C:\imagem1.raw
C:\imagem2.raw
C:\imagem3.raw
143
149
1734
1738

146
154
1665
1677

84
116
1526
1557

120
126
9
12

101
118
1751
1772

188
192
1920
1925

*****Parameters for generate the Pan e M reduced ****
*****Band 1:Panchromatic's weight*****
0.617

*****Band 2:Panchromatic's weight*****
0.383

*****Band 3:Panchromatic's weight*****
0.000

Spatial scale for M:
2
```

Figura 6.32: Exemplo do ficheiro de texto “Info.txt” após a execução completa.

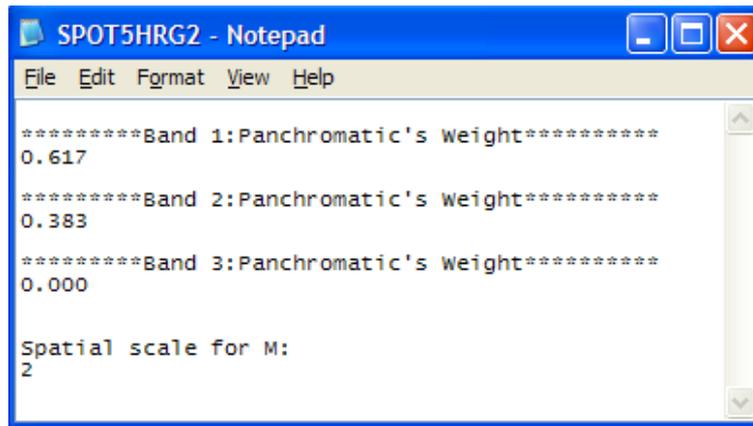


Figura 6.33: Ficheiro de texto “SPOT5HRG2.txt” com os parâmetros do sensor.

No final é possível a criação da imagem PAN e das bandas da imagem ML, pressionando o botão *Create the PAN and reduced bands*. As imagens são criadas em formato raw e guardadas no directório do projecto.

6.5.2 Seleccionar um sensor existente

No caso de se pretender simular um sensor previamente definido, é possível utilizar a informação já existente seleccionando a opção *Select an existing sensor* no painel inicial do teste de fusão (figura 6.27). O utilizador deverá então indicar o caminho para o ficheiro de texto que contém os parâmetros do sensor.

O programa lê o ficheiro e verifica se o número de bandas nele apresentado é igual ao número de bandas da imagem de satélite usada como referência. Se tal não se verificar aparecerá a mensagem da figura 6.34. Caso contrário, a informação do sensor, extraída do ficheiro de texto, é anexada ao ficheiro do projecto (Info.txt) e usada para criar as imagens PAN e ML.



Figura 6.34: Mensagem de erro se o número de bandas do sensor for diferente do número de bandas da imagem de referência.

Terminada a construção das imagens PAN e bandas ML, através de uma das formas descritas em 6.5.1 ou 6.5.2, aparece de novo o painel principal com a indicação de que as imagens foram criadas. Nesta fase, a opção *Fusion Test* fica desactivada (figura 6.35).

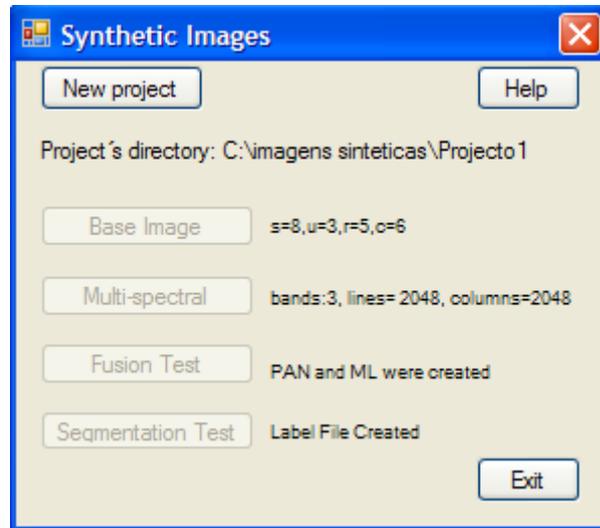


Figura 6.35: Painel principal com indicação de que as imagens PAN e ML foram criadas.

6.6 Considerações finais

Após a execução de todas as etapas de processamento, o utilizador tem o painel principal com apenas três funções activas - *New project*, *Help* e *Exit* – permitindo apenas consultar a ajuda (*Help*), terminar o programa (*Exit*) ou iniciar um novo projecto (*New project*).

A aplicação computacional descrita neste capítulo é de fácil utilização, permitindo a qualquer utilizador gerar imagens sintéticas, para testes de fusão e de segmentação. No futuro poderão ser implementadas diversas melhorias para aumentar as potencialidades/funcionalidades desta aplicação. Como exemplo podem referir-se as seguintes alterações: permitir imagens de referência com mais de três bandas e permitir imagens de referência com mais de 2050 linhas/colunas.

Uma primeira versão desta aplicação encontrar-se-á, brevemente, disponível no site www.fc.up.pt/sitef, e poderá ser consultada e utilizada, gratuitamente, por qualquer interessado.

7.

Conclusões

A produção de imagens de satélite multiespectrais de alta resolução espacial através de processos de fusão é cada vez mais frequente, uma vez que o número de sensores que recolhem imagens em dois modos (pancromático+multiespectral) tem tendência a aumentar. O processo de fusão requer uma imagem de alta resolução espacial pancromática e uma imagem multiespectral de menor resolução espacial, gerando-se, pelo processo de fusão, uma imagem multiespectral de alta resolução espacial (imagem fundida). A imagem fundida é geralmente satisfatória a nível visual, sendo no entanto necessário avaliar até que ponto ela representa uma melhoria em relação à imagem original, quando se pretendem fazer medidas quantitativas. A avaliação das imagens fundidas é normalmente feita pixel a pixel ou banda a banda. Contudo, a avaliação da fusão num determinado conjunto de pixels, tratados como um bloco (ou parcela) é um tema pouco estudado. Por este motivo, propôs-se neste trabalho uma metodologia para efectuar esse tipo de avaliação.

A metodologia de avaliação de fusão proposta baseia-se na criação de imagens sintéticas, usando uma imagem multiespectral de satélite como referência. Para ilustrar o método foram usadas duas imagens de satélite da mesma região, dos sensores Landsat TM e SPOT HRG. Identificaram-se áreas de treino para diferentes classes de ocupação do solo nestas imagens, cujas características espectrais foram usadas para gerar uma imagem sintética de alta resolução (MF), simulando o terreno com parcelas de tamanho conhecido. A partir desta imagem foram geradas duas versões PAN e ML, que foram posteriormente usadas para produzir uma imagem fundida. Foram criadas imagens de NDVI a partir das imagens MF, ML e fundida de forma a avaliar o processo de fusão, através da comparação dos valores de NDVI para as várias parcelas quadradas.

Neste trabalho foram testados seis métodos de fusão: Brovey, IHS cilíndrico, IHS hexacónico, PCA, Wavelet IHS e Wavelet banda única. Cada método foi avaliado através dos seguintes parâmetros: coeficiente de correlação, raiz quadrada do erro médio, distância euclidiana média e erro absoluto em NDVI. Em todos estes parâmetros, os resultados obtidos indicaram que, no caso do SPOT HRG os melhores métodos de fusão foram o Brovey, o IHS hexacónico e o Wavelet IHS, e no Landsat TM os melhores métodos foram o PCA, o Wavelet IHS e o Wavelet banda única. O melhor método de fusão, combinando os resultados dos dois

sensores, foi o Wavelet IHS, o que coincide com alguns estudos científicos publicados sobre fusão de imagens (ver capítulo 2.3). No entanto, no caso de cálculo de valores médios de NDVI por parcela, os valores obtidos a partir da imagem ML, foram melhores que os obtidos pelas imagens fundidas, apesar das diferenças serem muito pequenas para o melhor método de fusão.

De um modo geral, tanto as imagens fundidas como a imagem ML produziram valores de NDVI bastante próximos dos da imagem MF. Excepto para as parcelas de menor dimensão, as diferenças de NDVI são na ordem das centésimas (inferiores a 0.02), o que é pouco significativo. Como tal, pode concluir-se que à medida que o tamanho da parcela aumenta, as diferenças entre as imagens vão sendo cada vez menores. Isto deve-se ao facto de as parcelas vizinhas terem cada vez menos influência nos resultados.

Os resultados obtidos usando a metodologia de avaliação proposta neste trabalho, indicam que os valores médios de NDVI calculados para parcelas de terreno são melhores usando a imagem multiespectral de baixa resolução do que usando a imagem fundida. Assim conclui-se, através do procedimento experimental adoptado neste estudo, que a imagem fundida não traz qualquer vantagem em relação à imagem multiespectral original de baixa resolução.

Alguns dos aspectos que poderão ter levado a estas conclusões devem-se ao modo de como se efectuou a criação das imagens sintéticas. A criação da imagem ML, a partir de MF, usando uma média pode levar à introdução de grandes distorções na imagem ML. Para evitar estas distorções poderia fazer-se, em vez da média, uma decimação, usando por exemplo um filtro gaussiano. Também a criação da imagem PAN, através de uma combinação linear das bandas multiespectrais, poderá introduzir algumas distorções espectrais na imagem fundida. O impacto destes processos no resultado da fusão será alvo de trabalho futuro.

Uma outra componente deste trabalho foi o desenvolvimento duma aplicação computacional para criação de imagens sintéticas (brevemente disponível em www.fc.up.pt/sitef). Esta aplicação consistiu no desenvolvimento de uma interface gráfica robusta e de fácil utilização, construída sobre os vários programas em C criados durante o trabalho. O objectivo é que esta ferramenta computacional permita a divulgação da metodologia de criação de imagens sintéticas desenvolvida, podendo ser usada para testes de fusão ou de segmentação de imagens. A aplicação que corre em ambiente windows, permite ao utilizador escolher os parâmetros que controlam a criação das imagens sintéticas multiespectrais, dos sensores a simular, e a imagem de satélite e classes de ocupação do solo de referência.

Referências

- Balcik, F.B. e Sertel, E.**, “Wavelet-Based Image Fusion of Landsat ETM Images: A Case Study for Different Landscape Categories of Istanbul”, *Conference on Information Extraction from SAR and Optical Data, with Emphasis on Developing Countries, Istanbul, 2007*.
- Baudoin, A.**, “The SPOT Programme: Today and beyond 2000”, *Photogrammetric Week, 1995*, pp.63-75.
- Cao, W., Li, B. e Zhang, Y.**, “A Remote Sensing Image Fusion Method Based on PCAA Transform and Wavelet Packet Transform”, *IEEE International Conference Neural Networks & Signal Processing, Nanjing, 2003*, pp. 976-981.
- Gonzalez, R.C.**, “Digital Image Processing”, Prentice Hall, 2nd Edition, 2002, pp. 289-298.
- Han, S.H. e Kang, J.M.**, “Image Fusion of Landsat and Korean Satellite Kompsat”, *XXth ISPRS Congress, Istanbul, 2004*, pp. 507- 512.
- Hill, J., Diemer, C., Stover, O. e Udelhoven, Th.**, “A Local Correlation Approach for the Fusion of Remote Sensing Data with Different Spatial Resolutions in Forestry Applications”, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, Part 7-4-3 W6, 1999.
- Jensen, J.R.**, “Remote Sensing of the Environment- An Earth Resource Perspective”, Prentice Hall, 2000.
- Karathanassi, V., Kolokousis, P. e Ioannidou, S.**, “A comparison study on fusion methods using evaluation indicators”, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28, no. 10, 2007, pp. 2309-2341.

- Li, J., Luo, J., Ming, D. e Shen, Z.**, “A New Method for Merging IKONOS Panchromatic and Multispectral Image Data”, *IEEE Publications*, 2005, pp. 3916 – 3919.
- Maia, F.**, “Aplicação da Detecção Remota à Análise da Paisagem: Caso do Parque Nacional da Peneda-Gerês”, *Tese de Mestrado*, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2007.
- Meenakshisundaram, V. e Couloigner, I.**, “Quality Assessment of Fusion Methods for High Resolution Images”, *3rd International Symposium Remote Sensing and Data Fusion Over Urban Areas (URBAN)*, 2005.
- Napoleão, M.C., Lingnau, C. e Felipe, A.F.A.A.F.**, “A Influência dos Métodos de Reamostragem na Fusão de Imagens Landsat_5 TM e SPOT Pancromática”, *GEODÈSIA- Comissão Brasileira de Geodesia*, 2001.
- Pôças, I., Cunha, M. e Pereira, L.**, “Pastagens seminaturais de montanha: Lameiros, sistemas ancestrais no século XXI”, Taller CYTED XVII. El agua en Ibero-América: tecnologías apropiadas e tecnologías ancestrales. Universidade de Piura-Peru, Lima (Piura), 2006 (<http://ceer.isa.utl.pt/cyted/peru2006/papers/>).
- Pohl, C. e Touron, H.**, “Operational Applications of Multi-sensor Image Fusion”, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol.32, Part 7-4-3 W6, 1999.
- Ranchin, T. e Wald, L.**, “Fusion of High Spatial and Spectral Resolution Images: The ARSIS Concept and its Implementation”, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol.66, No.1, 2000, pp 49-61.
- Ranchin, T., Aiazzi, B., Alparone, L., Baronti, S. e Wald, L.**, “Image Fusion – The ARSIS Concept and Some Successful Implementation Schemes”, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol.58, 2003, pp. 4-18.

Sanjeevi, S., Vani, K. e Lakshmi, K., “Comparaison of Conventional and Wavelet Transform Techniques for Fusion of IRS-1C LISS-III and PAN Images”, *22nd Asian Conference on Remote Sensing*, 2001.

Scheunders, P. e De Backer, S., “Fusion and merging of multispectral images using multiscale fundamental forms”, *Journal of the Optical Society of America A*, vol.18, no.10, 2001, pp. 2468-2477.

Sobrino, J.A., Jiménez_Muñoz, J. C. e Paolini, L., “Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5”, *Remote Sensing of Environment*, No. 90, 2004, pp.434-440.

Vijayaraj, V., “A Quantitative Analysis of Pansharpened Images”. *Tese de Mestrado, Faculdade do Estado de Mississipi*, 2004.

Vijayaraj, V., O’Hara, C.G e Younan, N., “Quality analysis of Pansharpened Images”. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International*, vol.1, 2004, pp. 85- 88.

Wald, L., Ranchin, T. e Mangolini, M., “Fusion of Satellite Images of Different Spatial Resolutions: Assessing the Quality of Resulting Images”, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol.63, No.6, 1997, pp 691-699.

Wald, L., “Data Fusion: Definitions and Architectures. Fusion of images of different spatial resolutions”, *Les Presses de l’ École des Mines, Paris*, 2002, pp.75-98.

Wang, L., Zhang, Y. e Feng, J., “On the Euclidian Distance of Images”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.27, No.8, 2005, pp.1334- 1339.

Wehrmann, T., Colditz, R.R., Bachmann, M., Steinnocher, K. e Dech, S., “Evaluation of Image Fusion Techniques”, *Remote Sensing & GIS Environmental Studies*, vol.113, 2005, pp. 296-302.

Zhou, J., Civco, D. L. e Silander, J. A., “A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data”, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, no. 4, 1998, pp. 743-757.

Páginas de Internet Consultadas

- Canada Centre for Remote Sensing (www.nrcan.gc.ca), Tutorial: “Fundamentals of Remote Sensing”, pp.152-153, visto em 01/10/2007.
- Engesat Home Page (<http://www.engesat.com.br/>), visto em 12/11/2007.
- Erdas Field Guide 2005, Leica Geosystems, pp.181-189, visto em 19/12/2007 (http://rocky.ess.washington.edu/data/erdas_pdfs/FieldGuide.pdf).
- FIFE 2004 (http://daac.ornl.gov/FIFE/guides/Satellite_SPOT_Extracted_Data.html), Satellite SPOT Extracted Data, visto em 12/12/2007.
- GAEL 2003 (http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/landsat_FAQ/), *Inventory of Landsat product anomalies*, Issue 1, Revision 0, visto em 07/11/2007.
- ITT Corporation 2007 (<http://www.ittvis.com/ENVI/>), visto em 19/12/2007.
- Landsat Home Page (<http://landsat.org/>), visto em 12/11/2007.
- Leica Geosystems 2007 (<http://gi.leica-geosystems.com/default.aspx>), visto em 19/12/2007.
- MSDN Home Page (<http://msdn2.microsoft.com>), visto em 22/01/2008.
- PCI Geomatics 2005 (<http://www.pcigeomatics.com/>), visto em 19/12/2007.
- SPOT website (<http://www.spotimage.fr/>), visto em 12/11/2007.

Apêndice 1 – Documento de instruções do funcionamento da interface gráfica

Synthetic Images: Instructions

This document presents the main instructions to use synthetic images production software.

- Exit: The present window is closed and the software ends.
- New Project: A new window is opened to indicate the directory and project name. The directory should be select using the right button (represented by ...), and the name of the project should be directly written in the textbox. After entering the appropriate data and clicking “OK”, the initial screen window appears.
- Base Image: a new window is opened and the user is asked to specify the base image parameters: scale (s), unit parcel size (u), repetition (r) and number of classes (c). None of these parameters can be left void. The minimum value and maximum are 1 and 10 for all parameters. The base image is created and saved in the project folder by clicking in the “Create base image” button.
- Multi spectral: For this option it is necessary to specify the characteristics of the multi-spectral (satellite) image to be used as reference. Firstly, a window is opened and the user is asked to enter the number of bands, lines and columns of the raw multi-spectral satellite image. For the bands the maximum acceptable value is 3 and for the lines and columns fields the maximum is 2050. The minimum value for all parameters is 1. Next, a new window is opened so that the user can indicate the paths to each satellite band file. The next window opened allows the user to input the location of the rectangular training areas of each class the rectangular areas are specified by the image coordinates of the Top Left Corner (Xminimum, Yminimum) of the class and the Bottom Right Corner (Xmaximum, Ymaximum). None of these parameters can be empty, the minimum value is 1 and the Xminimum/Xmaximum (Yminimum/Ymaximum) can not have the same value. The rectangular areas specified have to fall inside the image. Finally, it is necessary to select the base image created earlier using the option “Open”. The option “Create a multi-spectral image” is the final step of this process.
- Fusion Test: This option is used to create additional panchromatic and multispectral reduced synthetic images. For this it is necessary to indicate the weights of the multi-spectral bands used to produce the panchromatic image. The weights must have values between 0 and 1. Next it is necessary to identify the spatial scale of the sensor used in the acquisition of the satellite image. This spatial scale refers to the $\frac{l}{h}$ quotient, where h is the high spatial resolution (panchromatic image) pixel size and l is the low spatial resolution (multi-spectral image) pixel size. Finally, the option “Create the PAN and reduced bands” creates the two additional images required for the fusion test.
- Segmentation Test: This option is used to create an image with the labels for the base image. The result is a 16-bits image which each parcel represented in the base image has a different label (integer value) assigned. The first parcel in the image (Top Left Corner) has value 1 and the last (Bottom Right Corner) has a label value $(s \times r)^2$.

