

UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE  
COMPOSTELA



ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE ENXEÑARÍA

# Rexistrado de imaxes hiperespectrais baseado na transformada rápida de Fourier

*Autor:*

Álvaro Ordóñez Iglesias

*Directores:*

Francisco Argüello Pedreira  
Dora Blanco Heras

**Grao en Enxeñaría Informática**

**Xullo 2015**

Traballo de Fin de Grao presentado na Escola Técnica Superior de Enxeñaría  
da Universidade de Santiago de Compostela para a obtención do Grao en  
Enxeñaría Informática





**D. Francisco Argüello Pedreira**, Profesor do Departamento de Electrónica e Computación da Universidade de Santiago de Compostela, e **Dna. Dora Blanco Heras**, Profesora do Departamento de Electrónica e Computación da Universidade de Santiago de Compostela,

INFORMAN:

Que a presente memoria, titulada *Registrado de imaxes hiperespectrais baseado na transformada rápida de Fourier*, presentada por **D. Álvaro Ordóñez Iglesias** para superar os créditos correspondentes ao Traballo de Fin de Grao da titulación de Grao en Enxeñaría Informática, realizouse baixo a nosa dirección no Departamento de Electrónica e Computación da Universidade de Santiago de Compostela.

E para que así conste aos efectos oportunos, expiden o presente informe en Santiago de Compostela, a 8 de xullo de 2015:

O director,

A directora,

O alumno,

Francisco Argüello Pedreira    Dora Blanco Heras    Álvaro Ordóñez Iglesias



# Agradecementos

Cando comecei a escribir esta memoria non sabía moi ben se eliminar o *include* que engadía esta sección ao documento e así evitarme o quebracabezas de ter que escribila e que total, ninguén lería. Finalmente, deixei no estar por se ao rematar de redactar me viña a inspiración.

Por unha parte quero agradecerlle este traballo a aquelas persoas que sen elas esta etapa de catro anos, a cal este Traballo de Fin de Grao lle pon fin, tería sido máis difícil do que xa foi e por outra parte a aquelas persoas polas que este traballo non existiría ou non sería o mesmo.

A miña familia, especialmente a meus pais e a miña irmá, por todo o apoio e axuda recibida dende que era un alcance de proxecto.

A miña moza por todo a paciencia que tivo e ten comigo.

Aos meus amigos e a todos os compañeiros da carreira por estes catro anos increíbles e en especial a Adrián, Antón, Brais, Iria, Spínola, Víctor...

Aos directores do proxecto por terme proposto este traballo, pola súa amabilidade, dedicación e incondicional axuda e ensinanzas.

A Jorge A. Suárez por aguantar todas as miñas dúbidas sobre GTK+ e *Hy-  
peRvieW*.



# Índice xeral

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Obxectivos . . . . .	2
1.2. Estrutura do presente documento . . . . .	5
1.3. Rexistrado de imaxes hiperespectrais . . . . .	6
<b>2. Enunciado do Alcance do Proxecto</b>	<b>11</b>
2.1. Definición do Alcance do Proxecto . . . . .	11
2.2. Criterios de aceptación do Proxecto . . . . .	11
2.3. Entregables do Proxecto . . . . .	12
2.4. Exclusións do Proxecto . . . . .	12
2.5. Restricións do Proxecto . . . . .	12
2.6. Supostos do Proxecto . . . . .	12
<b>3. Xestión do Proxecto</b>	<b>13</b>
3.1. Xestión da Configuración . . . . .	13
3.1.1. Sistema de almacenamento . . . . .	13
3.1.2. Control de cambios . . . . .	15
3.2. Xestión do Alcance . . . . .	15
3.2.1. Metodoloxía de desenvolvemento . . . . .	15
3.2.2. Estrutura de Descomposición do Traballo . . . . .	18
3.3. Xestión do Tempo . . . . .	18
3.4. Xestión dos Custos . . . . .	24
3.4.1. Custos relativos ao persoal . . . . .	25
3.4.2. Custos relativos ao material . . . . .	27
3.4.3. Custos relativos ao software . . . . .	29
3.4.4. Custos totais . . . . .	29
3.5. Xestión de Riscos . . . . .	29
3.5.1. Identificación de riscos . . . . .	30
3.5.2. Especificación de riscos . . . . .	32
<b>4. Análise</b>	<b>39</b>
4.1. Análise de Requisitos . . . . .	39
4.1.1. Glosario . . . . .	40

4.1.2.	Participantes no proxecto . . . . .	40
4.1.3.	Catálogo de Requisitos . . . . .	40
4.1.4.	Especificación de Requisitos . . . . .	44
4.2.	Iteracións . . . . .	63
4.2.1.	Iteración 1: Algoritmo FFT . . . . .	64
4.2.2.	Iteración 2: Imaxes hiperespectrais . . . . .	64
4.2.3.	Iteración 3: Algoritmo gradientes . . . . .	65
4.2.4.	Iteración 4: Algoritmo MLFFT . . . . .	65
4.2.5.	Iteración 5: Introducción do rexistrado como módulo da ferramenta <i>HypeRvieW</i> . . . . .	66
4.3.	Casos de uso . . . . .	67
4.3.1.	Diagrama de casos de uso . . . . .	68
4.3.2.	Especificación de casos de uso . . . . .	69
4.3.3.	Matriz de trazabilidade . . . . .	72
<b>5.</b>	<b>Deseño</b>	<b>75</b>
5.1.	Tecnoloxías e linguaxes de programación . . . . .	75
5.2.	Diagrama de fluxo . . . . .	76
5.3.	Diagramas de fluxo de datos . . . . .	77
5.3.1.	Diagrama de contexto . . . . .	80
5.3.2.	Diagrama do sistema . . . . .	81
5.3.3.	Diagramas de nivel dous . . . . .	81
5.3.4.	Diagramas de nivel tres . . . . .	83
5.3.5.	Diccionario de datos . . . . .	86
5.4.	Modelo de datos . . . . .	100
<b>6.</b>	<b>Implementación</b>	<b>101</b>
6.1.	Redución da dimensionalidade da imaxe hiperespectral . . . . .	101
6.1.1.	Gradientes . . . . .	101
6.1.2.	PCA . . . . .	103
6.2.	Algoritmo baseado na FFT . . . . .	106
6.2.1.	Correlación cruzada . . . . .	107
6.2.2.	Log-polar . . . . .	108
6.2.3.	Algoritmo final baseado na FFT . . . . .	110
6.3.	Algoritmo gradientes . . . . .	114
6.4.	Algoritmo MLFFT . . . . .	116
<b>7.</b>	<b>Validación e probas</b>	<b>121</b>
7.1.	Imaxes empregadas nas probas . . . . .	121
7.2.	Técnicas de redución de dimensionalidade . . . . .	122
7.3.	Algoritmos . . . . .	128
7.4.	Probas con ruído branco . . . . .	129
7.5.	Módulo interface gráfica . . . . .	131

7.6. Validación de requisitos . . . . .	135
<b>8. Conclusións</b>	<b>143</b>
8.1. Posibles ampliacións . . . . .	144
<b>9. Glosario</b>	<b>147</b>
9.1. Definicións . . . . .	147
9.2. Acrónimos . . . . .	148
<b>A. Manual de usuario</b>	<b>151</b>
A.1. Módulo <i>HypeRvieW</i> . . . . .	151
A.1.1. Manual de instalación . . . . .	151
A.1.2. Rexistrado dunha imaxe . . . . .	152
A.2. Ferramenta de rexistrado por liña de comandos . . . . .	161
A.2.1. Manual de instalación . . . . .	161
A.2.2. Execución e parámetros . . . . .	161
<b>Bibliografía</b>	<b>165</b>



# Índice de figuras

1.1. Cubo hiperespectral. . . . .	7
1.2. Cubo hiperespectral dunha imaxe do sensor AVIRIS. . . . .	8
1.3. Bandas da imaxe hiperespectral da Universiade de Pavia [13]. a) Imaxe orixinal, de referencia (esquerda). b) Imaxe a rexistrar conseguida a partir da de referencia escalándoa 4x, rotándoa 225° e aumentando a resolución (centro). c) Imaxe a rexistrar conseguida a partir da de referencia escalándoa 4x, rotándoa 225° e sen aumentar a resolución (dereita). . . . .	9
1.4. Imaxes de entrada do algoritmo logo de ser axustadas as súas resolucións. Neste caso, a imaxe de referencia (esquerda) tívoselle que aumentar a resolución para igualar a que se quere rexistrar (dereita). . . . .	10
3.1. Exemplo dun ciclo iterativo . . . . .	17
3.2. EDT . . . . .	19
3.3. Planificación mediante un diagrama de Gantt. . . . .	22
4.1. Diagrama de casos de uso. . . . .	69
5.1. Diagrama de fluxo do algoritmo . . . . .	78
5.2. Diagrama de contexto do sistema . . . . .	80
5.3. DFD de nivel 1 ou diagrama do sistema . . . . .	81
5.4. DFD de nivel 2: Extraer características . . . . .	82
5.5. DFD de nivel 2: Rexistrar imaxes . . . . .	83
5.6. DFD de nivel 3: Achar ángulo e escala . . . . .	84
5.7. DFD de nivel 3: Achar desprazamento . . . . .	85
5.8. DFD de nivel 3: Procesar resultados . . . . .	86
6.1. Un vector dun pixel dunha imaxe hiperespectral de 4 bandas (adaptación de [29]) . . . . .	105
6.2. Representación gráfica dunha aproximación do espazo cartesiano (esquerda) ao espazo polar (dereita) [31]. . . . .	109

6.3. As diferentes capas/grellas dunha MLFFT con {Resolución} = {0.1; 0.6; 1.0} (a) Capa $P_1$ , (b) Capa $P_2$ , (c) Capa $P_3$ , (d) Unión de capas ( $P$ ) (tomado de [35]) . . . . .	118
7.1. Imaxe hiperespectral Universidade de Pavia. Composición falsa a cor (esquerda) e banda 12 da imaxe (dereita). . . . .	122
7.2. Imaxe hiperespectral do centro de Pavia. Composición falsa a cor (esquerda) e banda 48 da imaxe (dereita). . . . .	123
7.3. Imaxe hiperespectral do val de Salinas (California). Composición falsa a cor (esquerda) e banda 10 da imaxe (dereita). . . . .	123
7.4. Imaxe da Universidade de Pavia. a) Banda 3 orixinal. b) Banda 3 con 20dB de ruído branco gaussiano. c) Banda 3 con 16dB de ruído branco gaussiano. d) Banda 3 con 10dB de ruído branco gaussiano.	131
7.5. Rexistrado coa imaxe da Universidade de Pavia. a) Imaxe de referencia. b) Imaxe a rexistrar. Xerada a partir da de referencia (factor de escala 2 e ángulo de rotación $90^\circ$ ). c) Resultado do rexistrado. d) Resultado superposto na imaxe de referencia. . . . .	132
7.6. Rexistrado coa imaxe do centro de Pavia. a) Imaxe de referencia. b) Imaxe a rexistrar. Xerada a partir da de referencia (factor de escala 5.5, ángulo de rotación $45^\circ$ e desprazamento no eixo $x$ e $y$ de 50 píxeles). c) Resultado do rexistrado. d) Resultado superposto na imaxe de referencia. . . . .	132
A.1. Aspecto inicial da aplicación. . . . .	152
A.2. Icona da barra de ferramentas que permite abrir unha imaxe hiperespectral. . . . .	153
A.3. Selección dunha imaxe hiperespectral. . . . .	153
A.4. Ventana onde se especifican os datos dunha imaxe hiperespectral en formato RAW. . . . .	155
A.5. Aplicación cunha imaxe hiperespectral cargada. . . . .	156
A.6. Icona da barra de ferramentas que permite configurar os módulos. . . . .	156
A.7. Ventana de configuración de <i>plugins</i> . . . . .	157
A.8. Ventana de parámetros do módulo de rexistrado. . . . .	158
A.9. Icona da barra de ferramentas que permite iniciar o proceso de rexistrado. . . . .	158
A.10. Ventana de seguimento do proceso de rexistrado. . . . .	159
A.11. Proceso de rexistrado en funcionamento. . . . .	159
A.12. Resultado do proceso de rexistrado. . . . .	160
A.13. Carpeta outputs coa imaxe rexistrada en formato RAW e PGM (primeira banda). . . . .	160

# Índice de cadros

3.1. Planificación estimada no anteproxecto. . . . .	23
3.2. Comparación da planificación estimada no anteproxecto coa planificación real (en horas). . . . .	24
3.3. Salario bruto. . . . .	26
3.4. Custo para a empresa por rol de recurso humano. . . . .	26
3.5. Custo para a empresa por rol de recurso humano en horas. . . . .	27
3.6. Software empregado durante todo o proxecto. . . . .	29
3.7. Custo total do proxecto . . . . .	29
3.8. Valorización do impacto sobre o prazo de entrada, esforzo e custo. . . . .	31
3.9. Valorización da probabilidade da ocorrencia dun risco. . . . .	31
3.10. Nivel de exposición ao risco. . . . .	31
3.11. Modelo para a especificación dos riscos. . . . .	32
3.12. Listaxe cos riscos identificados e analizados (Parte 1). . . . .	33
3.13. Listaxe cos riscos identificados e analizados (Parte 2). . . . .	34
3.14. Risco R-01 . . . . .	34
3.15. Risco R-02 . . . . .	34
3.16. Risco R-03 . . . . .	35
3.17. Risco R-04 . . . . .	35
3.18. Risco R-05 . . . . .	36
3.19. Risco R-06 . . . . .	36
3.20. Risco R-07 . . . . .	37
3.21. Risco R-08 . . . . .	37
3.22. Risco R-09 . . . . .	38
3.23. Risco R-10 . . . . .	38
4.1. Participantes do proxecto. . . . .	40
4.2. Nomenclaturas de requisitos . . . . .	41
4.3. Modelo de especificación de requisitos . . . . .	44
4.4. Tipos de importancia de requisitos . . . . .	44
4.5. Requisito RF-01: Cargar ficheiro de datos en formato RAW. . . . .	45
4.6. Requisito RF-02: Calcular Componentes Principais (PCA) dunha imaxe de entrada. . . . .	45
4.7. Requisito RF-03: Calcular gradiente RCMG dunha imaxe de entrada. . . . .	46

4.8. Requisito RF-04: Calcular gradiente vectorial dunha imaxe de entrada. . . . .	47
4.9. Requisito RF-05: Calcular gradiente RCMG das bandas PCA dunha imaxe de entrada. . . . .	48
4.10. Requisito RF-06: Calcular gradiente vectorial das bandas PCA dunha imaxe de entrada. . . . .	49
4.11. Requisito RF-07: Aplicar o algoritmo a unha ou varias (de forma individual) bandas PCA. . . . .	50
4.12. Requisito RF-08: Calcular a media de unha ou varias bandas consecutivas PCA. . . . .	51
4.13. Requisito RF-09: Rexistrar unha imaxe a partir doutra tamén proporcionada. . . . .	51
4.14. Requisito RF-10: Rexistrar unha imaxe a partir doutra auto-xerada. . . . .	52
4.15. Requisito RF-11: Rotar, escalar e desprazar unha imaxe dunha soa banda. . . . .	52
4.16. Requisito RF-12: Rotar, escalar e desprazar unha imaxe hiperespectral. . . . .	53
4.17. Requisito RF-13: Amosar o ángulo de rotación, o factor de escala e os valores de desprazamento obtidos do rexistrado. . . . .	53
4.18. Requisito RF-14: Gardar imaxe resultante do proceso de rexistrado en formato RAW. . . . .	54
4.19. Requisito RF-15: Gardar imaxe resultante do proceso de rexistrado en formato PGM. . . . .	54
4.20. Requisito RF-16: Interface por liña de comandos. . . . .	55
4.21. Requisito RF-17: Crear módulo para <i>HypeRvieW</i> cos mellores algoritmos e técnicas de redución de dimensionalidade desenvolvidos (interface gráfica). . . . .	55
4.22. Requisito RF-18: Permitir especificar parámetros numéricos do proceso de rexistrado. . . . .	56
4.23. Requisito RF-19: Permitir elixir algoritmo. . . . .	56
4.24. Requisito RF-20: Permitir elixir técnica de redución de dimensionalidade. . . . .	57
4.25. Requisito RF-21: Amosar imaxe hiperespectral de entrada. . . . .	57
4.26. Requisito RF-22: Amosar imaxe resultante do proceso de rexistrado. . . . .	58
4.27. Requisito RF-23: Ver e gardar a saída textual do proceso de rexistrado. . . . .	58
4.28. Requisito RNP-01: O algoritmo deberá detectar escalados de polo menos ata 3x con calquera rotación e desprazamento. . . . .	59
4.29. Requisito RNP-02: Concluir que algoritmo é o máis eficiente e sobre que técnica de redución de dimensionalidade. . . . .	59
4.30. Requisito RNP-03: A interface gráfica deberá contar cunha alta usabilidade, eficiencia, eficacia e fiabilidade. . . . .	60

4.31. Requisito RNP-04: A interface gráfica do módulo de rexistrado debera incluír unha axuda. . . . .	60
4.32. Requisito RNO-01: Desenvolvemento dos algoritmos e técnicas mediante linguaxe de programación C. . . . .	61
4.33. Requisito RNO-02: O sistema desenvolverase para sistemas operati- vos Linux. . . . .	61
4.34. Requisito RNE-01: Desenvolvemento do módulo para interface gráfi- ca mediante GTK+. . . . .	62
4.35. Requisito RD-01: O algoritmo deberá rexistrar imaxes hiperespec- trais. . . . .	62
4.36. Requisito RD-02: O algoritmo deberá estar baseado na Transfor- mada Rápida de Fourier. . . . .	63
4.37. Especificación dun actor. . . . .	69
4.38. Especificación dun caso de uso. . . . .	70
4.39. Actor: Usuario. . . . .	70
4.40. Caso de uso CU-01: Rexistrar unha imaxe auto-xerada respecto a unha imaxe. . . . .	71
4.41. Caso de uso CU-02: Rexistrar imaxes dende ficheiro . . . . .	72
4.42. Matriz de trazabilidade. . . . .	73
5.1. Almacén de datos: Ficheiros . . . . .	87
5.2. Entidade externa: Usuario . . . . .	87
5.3. Entidade externa: Monitor . . . . .	87
5.4. Proceso: Rexistrado de imaxes hiperespectrais . . . . .	88
5.5. Proceso: Extraer características . . . . .	88
5.6. Proceso: Rexistrar imaxes . . . . .	88
5.7. Proceso: Transformar datos . . . . .	88
5.8. Proceso: Aplicar técnica de extracción . . . . .	89
5.9. Proceso: Achar ángulo e escala. . . . .	89
5.10. Proceso: Achar desprazamento. . . . .	89
5.11. Proceso: Procesar resultados. . . . .	89
5.12. Proceso: Calcular FFT. . . . .	90
5.13. Proceso: Calcular FFTShift. . . . .	90
5.14. Proceso: Realizar Filtro pasa-alta. . . . .	90
5.15. Proceso: Calcular Log-Polar. . . . .	90
5.16. Proceso: Calcular correlación-cruzada. . . . .	91
5.17. Proceso: Ordenar valores ( <i>Quicksort</i> ). . . . .	91
5.18. Proceso: Calcular ángulo e escala. . . . .	91
5.19. Proceso: Rotar e/ou Escalar imaxe. . . . .	91
5.20. Proceso: Calcular Correlacións cruzadas. . . . .	92
5.21. Proceso: Buscar valor máximo. . . . .	92
5.22. Proceso: Calcular desprazamento. . . . .	92
5.23. Proceso: Rotar, escalar e/ou desprazar imaxe hiperespectral. . . . .	92

5.24. Proceso: Imprimir por pantalla. . . . .	93
5.25. Fluxo de datos: Imaxe rexistrada. . . . .	93
5.26. Fluxo de datos: Parámetros. . . . .	93
5.27. Fluxo de datos: Imaxes de entrada. . . . .	93
5.28. Fluxo de datos: Resultado. . . . .	94
5.29. Fluxo de datos: Imaxe1. . . . .	94
5.30. Fluxo de datos: Imaxe2. . . . .	94
5.31. Fluxo de datos: Imaxe1 reducida. . . . .	94
5.32. Fluxo de datos: Imaxe2 reducida. . . . .	95
5.33. Fluxo de datos: Imaxe2 reducida. . . . .	95
5.34. Fluxo de datos: Imaxe1 transformada. . . . .	95
5.35. Fluxo de datos: Imaxe2 transformada. . . . .	95
5.36. Fluxo de datos: Ángulo. . . . .	96
5.37. Fluxo de datos: Escala. . . . .	96
5.38. Fluxo de datos: Desprazamento. . . . .	96
5.39. Fluxo de datos: FFT Imaxe1. . . . .	96
5.40. Fluxo de datos: FFT Imaxe2. . . . .	97
5.41. Fluxo de datos: FFTShift Imaxe1. . . . .	97
5.42. Fluxo de datos: FFTShift Imaxe2. . . . .	97
5.43. Fluxo de datos: Imaxe1 Filtrada. . . . .	97
5.44. Fluxo de datos: Imaxe2 Filtrada. . . . .	97
5.45. Fluxo de datos: LogPolar Imaxe1. . . . .	98
5.46. Fluxo de datos: LogPolar Imaxe2. . . . .	98
5.47. Fluxo de datos: Matriz correlación cruzada. . . . .	98
5.48. Fluxo de datos: Matriz correlación cruzada ordenada. . . . .	98
5.49. Fluxo de datos: Imaxe2 escalada e/ou rotada ángulo. . . . .	98
5.50. Fluxo de datos: Imaxe2 escalada e/ou rotada ángulo+180°. . . . .	99
5.51. Fluxo de datos: Matriz correlación cruzada 1. . . . .	99
5.52. Fluxo de datos: Matriz correlación cruzada 2. . . . .	99
5.53. Fluxo de datos: Max1. . . . .	99
5.54. Fluxo de datos: Max2. . . . .	99
7.1. Resultados das probas de rexistrado con gradiente vectorial e RCMG. . . . .	125
7.2. Resultados das probas de rexistrado con gradiente vectorial e RCMG das tres primeiras bandas PCA. . . . .	125
7.3. Resultados das probas de rexistrado con media das tres primeiras bandas PCA, con media de todas as bandas PCA e coa primeira banda PCA para factores de escala de 3.0 e 3.5. . . . .	126
7.4. Resultados das probas de rexistrado con media das tres primeiras bandas PCA e coa primeira banda PCA para un factor de escala 4.0. . . . .	126
7.5. Resultados das probas de rexistrado co algoritmo FFT e MLFFT para as imaxes da Universidade e do centro de Pavia. . . . .	129

7.6. Resultados das probas de rexistrado co algoritmo FFT e MLFFT para a imaxe do val de Salinas. . . . .	129
7.7. Resume dos resultados das probas con ruído. As porcentaxes indican a porcentaxe de rexistrados achados correctamente dentro de cada batería de probas (72 ángulos con cada factor de escala). . .	131
7.8. Probas do módulo de rexistrado para <i>HypeRvieW</i> (interface gráfica). 134	
7.9. Cadro explicativo das probas de validación de requisitos. . . . .	135
7.10. Proba de validación VPR-01. . . . .	135
7.11. Proba de validación VPR-02. . . . .	136
7.12. Proba de validación VPR-03. . . . .	136
7.13. Proba de validación VPR-04. . . . .	136
7.14. Proba de validación VPR-05. . . . .	137
7.15. Proba de validación VPR-06. . . . .	137
7.16. Proba de validación VPR-07. . . . .	137
7.17. Proba de validación VPR-08. . . . .	138
7.18. Proba de validación VPR-09. . . . .	138
7.19. Proba de validación VPR-10. . . . .	138
7.20. Proba de validación VPR-11. . . . .	139
7.21. Proba de validación VPR-12. . . . .	139
7.22. Proba de validación VPR-13. . . . .	140
7.23. Proba de validación VPR-14. . . . .	141
7.24. Proba de validación VPR-15. . . . .	141
7.25. Proba de validación VPR-16. . . . .	141
7.26. Proba de validación VPR-17. . . . .	142
7.27. Proba de validación VPR-18. . . . .	142
7.28. Proba de validación VPR-19. . . . .	142
7.29. Proba de validación VPR-20. . . . .	142



# Capítulo 1

## Introdución

Fronte ás típicas imaxes dixitais a cor, que só contan con 3 bandas de información (RGB), unha imaxe hiperespectral permite almacenar información da mesma escena espacial en diferentes rangos do espectro electromagnético, dende o visible ata o infravermello [1]. É dicir, son imaxes nas que cada punto ven descrito por un vector (restra ordenada de valores numéricos) de valores espectrais que se corresponden coa refracción da luz detectada nese punto en diferentes bandas do espectro. O nome de imaxe hiperespectral foi acuñado inicialmente no campo da visualización mediante satélites [2], aínda que hoxe en día tamén se obteñen imaxes deste tipo noutros ámbitos de aplicación tales como laboratorios e hospitais [3].

As imaxes de sensado remoto de cobertura terrestre adquirense mediante sensores situados en satélites ou avións que permiten obter as imaxes a un custo que é cada vez menor debido aos grandes avances tecnolóxicos que se veñen levando a cabo nos últimos anos. Exemplos de sensores é, por exemplo, o Airborne Visible Infra-Red Imaging spectrometer (AVIRIS) da NASA [4]. A análise dos datos do sensado remoto presenta retos abertos en canto á análise espectral, detección de obxectivos, clasificación e comparación. Investigacións nestes campos estanse realizando actualmente en moitas das universidades e centros de investigación a nivel mundial.

No caso de que as imaxes sexan da superficie terrestre é posible detectar en que zonas está presente determinada especie vexetal, materiais das estruturas urbanas, ríos, ... ou detectar cambios que se produciran ao longo do tempo. Unha operación fundamental nestas aplicacións é o rexistro (aliñado) de imaxes, procedemento mediante o cal se fan corresponder os puntos de dúas imaxes dunha mesma escena obtidas en diferentes instantes de tempo. Este proceso esixirá detectar os valores de desprazamento, escalado e rotación que permiten aliñar as dúas imaxes. Para facer posible esta operación desenvolveuse neste proxecto algoritmos que traballen coas imaxes hiperespectrais no dominio da frecuencia, isto

é, baseados na Transformada rápida de Fourier. Estes algoritmos serán capaces de realizar este traballo de xeito automático.

Inicialmente investigárase a aplicación ás imaxes hiperespectrais de métodos de rexistrado xa existentes para imaxes RGB e escala de grises. A aplicación destes métodos a estas imaxes non é directo, xa que no caso das imaxes hiperespectrais cada píxel corresponde con un vector de centos de compoñentes espectrais. Estudaranse distintos métodos e técnicas de extracción de características que nos permitan reducir a dimensionalidade como poden ser, a selección de bandas, a combinación de bandas, o cálculo de gradientes, a análise en compoñentes principais, e outras opcións que se describirán con maior detalle en vindeiros capítulos desta memoria.

Unha vez realizado o estudo descrito, desenvolveranse os algoritmos de rexistrado máis eficientes así como as técnicas de extracción de características máis prometedoras e probaranse diferentes posibilidades para aplicar os algoritmos de rexistrado ás imaxes hiperespectrais. Compararanse os resultados obtidos e concluirase este traballo de investigación cos efectos conseguidos.

Finalmente as mellores opcións de rexistrado para imaxes hiperespectrais serán incluídas como un módulo da ferramenta *HypeRvieW* [5] de análise e clasificación deste tipo de imaxes desenvolvida polo grupo de investigación no que se desenrola este traballo.

## 1.1. Obxectivos

O proxecto centrarase no estudo de diferentes algoritmos xa existentes para rexistro de imaxes RGB que están baseados na transformada rápida de Fourier. A raíz dese estudo seleccionaranse os máis prometedores para desenvolvelos e analizar diferentes posibilidades de aplicación destes algoritmos ás imaxes hiperespectrais, pois a súa aplicación non é directa.

Investigárase tamén sobre diferentes métodos de extracción de características das imaxes hiperespectrais para así poder reducir a súa dimensionalidade e quedarnos coa información máis relevante sobre a que se realizará o rexistrado. Os algoritmos desenvolvidos serán capaces de realizar o rexistrado de dúas imaxes hiperespectrais do mesmo obxecto ou localización, facendo corresponder os diferentes puntos mediante o cálculo do ángulo de rotación, factor de escala e translación dunha imaxe respecto da outra. Estes resultados deberán ser amosados tanto numericamente como xerar a imaxe resultante do proceso.

Traballárase sobre diferentes posibilidades de aplicación destas técnicas sobre diferentes versións do algoritmo. Realizaranse numerosas probas e modificacións co fin de conseguir un bo método de rexistrado. Concluírase o traballo cunha análise dos resultados obtidos.

Os algoritmos máis eficientes integráranse nun novo módulo da ferramenta *HypeRvieW* [5] de análise e clasificación de imaxes hiperespectrais. A inclusión deste traballo nunha interface gráfica permite aumentar a usabilidade, comodidade e satisfacción dos usuarios así como o entendemento e a eficiencia por parte dos mesmos pois conseguen con precisión realizar o proceso de rexistrado de imaxes hiperespectrais. Noutras palabras, os usuarios poderán así levar a cabo o rexistrado dun xeito máis sinxelo, rápido e amigable.

A motivación da realización deste Traballo De Fin de Grao xorde da súa evidente necesidade como preproceso a aplicar antes de outros procesos que nos permitan detectar cambios, como a cuantificación de especies nun ecosistema arbóreo en diferentes instantes temporais ou o seguimento de catástrofes naturais.

O aliñamento de imaxes baseado na Transformada Rápida de Fourier (FFT) foi proposto nun artigo de investigación [6] en 1994. Dende aquel ano numerosos artigos foron publicados realizando melloras e variacións. Sen embargo se falamos de rexistrado de imaxes hiperespectrais, este campo non é tan amplo. Existen métodos baseados en redes auto-organizadas [7], en algoritmos xenéticos [8] así como técnicas baseadas na FFT para o aliñamento de bandas dentro dunha mesma imaxe hiperespectral [9][10][11]. Mais o algoritmo que se propón neste traballo é innovador debido a non existencia dunha técnica baseada na Transformada Rápida de Fourier capaz de realizar o rexistrado sobre dúas imaxes hiperespectrais. É esta outra razón motivadora para o desenrolo deste proxecto.

Dunha forma máis específica estes son os obxectivos deste Traballo de Fin de Grao:

- Estudar os diferentes algoritmos xa existentes para rexistro de imaxes en escala de grises e RGB que están baseados na transformada rápida de Fourier.
- Analizar diferentes posibilidades de aplicación dos algoritmos de rexistrado estudados a imaxes hiperespectrais baseadas na redución de dimensionalidade das imaxes e seleccionar as técnicas máis axeitadas.
- Desenvolver algoritmos que partindo de dúas imaxes hiperespectrais do mesmo obxecto ou localización consigan achar o ángulo de rotación, o factor de escala e o desprazamento que diferencian dunha imaxe respecto da outra,

facilitando así posteriores usos como pode ser a clasificación ou comparación de diferentes instantes de tempo.

- Estudar diferentes posibilidades e combinacións dos algoritmos estudados e das técnicas de extracción de características.
- A implementación resultante, chamada ferramenta de rexistrado, deberá rexistrar as dúas imaxes hiperespectrais, lidas dende ficheiro, estimando a ángulo de rotación, o factor de escala e a translación dunha respecto da outra amosando o resultado numericamente e xerar unha imaxe resultado do aliñamento.
- Os algoritmos máis eficientes integraranse nun novo módulo da ferramenta *HypeRvieW* [5] de análise e clasificación de imaxes hiperespectrais. Incluír o traballo desenvolvido neste proxecto nunha interface gráfica permite aumentar a usabilidade, a eficiencia, a efectividade e a satisfacción nun contexto de uso por parte dun usuario. Crease deste xeito un produto software máis fácil de entender, de empregar e máis atractivo para o usuario final. A ferramenta *HypeRvieW* conta con diferentes módulos, xa existentes na aplicación, de clasificación de imaxes mediante técnicas de aprendizaxe supervisado baseadas en SVM ou ELM que foron desenvolvidas polo grupo de investigación. As características que engadiremos á ferramenta mediante o novo módulo de clasificación serán as seguintes:
  - Esta ferramenta permitiranos cargar, dun xeito doado, as imaxes hiperespectrais dende un ficheiro para o seu posterior procesado.
  - O deseño da aplicación permitirá incluír novas técnicas como módulo da mesma dunha maneira doada.
  - O seu deseño dotará a aplicación dunha complexidade mínima amosando de maneira intuitiva para o usuario a imaxe orixinal así como o resultado en formato gráfico e numérico.
  - Terá unha interface fácil de empregar e intuitiva.
  - Permitirá almacenar os resultados tanto en ficheiro de imaxe como os resultados numéricos.
  - Permitirá visualizar a imaxe hiperespectral de entrada banda a banda, movéndonos entre as bandas de forma secuencial ou aleatoria e permitindo ao usuario almacenar cada banda.
  - Permitirá realizar zoom nunha zona da imaxe podendo así ver os diferentes píxeles que forman esa parte da imaxe.
  - Permitirá visualizar a firma espectral de calquera dos píxeles que forman a imaxe mediante un histograma.

## 1.2. Estructura do presente documento

Nesta sección descríbense os diferentes apartados que conforman esta memoria e a información que aparece en cada un deles, e como esta foi estruturada.

Esta memoria presenta nove capítulos, dous apéndices e a bibliografía empregada que se describen a continuación:

- O Capítulo 1, *Introdución*, onde se realiza unha pequena aproximación aos conceptos xerais do que se vai desenvolver neste traballo así como se presentan os obxectivos e motivacións que fixeron que este traballo fora levado a cabo.
- O Capítulo 2, *Enunciado do Alcance do Proxecto*, onde se define o alcance do traballo, cales van ser os criterios de aceptación, cales son os produtos entregables, que límites e restricións vai ter para cumprir a planificación e con que supostos se parten.
- O Capítulo 3, *Xestión do Proxecto*, onde se describen as seccións relacionadas coa xestión do proxecto que se consideraron necesarias e oportunas para este traballo. Inclúe a xestión da configuración, a xestión do alcance, a xestión do tempo, a xestión de custos e a xestión de riscos.
- O Capítulo 4, *Análise*, onde se describe o proceso de análise que foi levado a cabo. Comprende a análise e especificación de requisitos, unha descrición máis detallada das iteracións que se levaran a cabo no ciclo de vida escollido no anterior capítulo froito dun estudo pormenorizado do que se vai desenvolver e o diagrama de casos de uso do sistema e a súa especificación.
- O Capítulo 5, *Deseño*, onde se presentan as linguaxes de programación e tecnoloxías escollidas enfrontándoas a alternativas e cunha breve explicación de porque se elixiron. Inclúe tamén un diagrama de fluxo que presenta a estrutura base dun algoritmo de rexistrado baseado na Transformada Rápida de Fourier, así como un diagrama de fluxo de datos que permite comprender mellor o traballo que se pretende desenvolver.
- O Capítulo 6, *Implementación*, onde inicialmente se presentan e describen as técnicas escollidas para a redución de dimensionalidade das imaxes hiperespectrais. A continuación presentase unha explicación con todo detalle das diferentes versións de algoritmos desenvolvidos.
- O Capítulo 7, *Validación e probas*, onde se recollen as probas realizadas e resultados obtidos para probar a precisión e eficacia dos métodos desenvolvidos e concluír cal ou cales son as mellores opcións para a realización do rexistrado. Especificanse tamén as probas para a validación dos requisitos

do sistema, unhas probas deseñadas para a proba da interface gráfica e os resultados das probas introducíndolle ruído branco á imaxe que se pretende rexistrar.

- O Capítulo 8, *Conclusiones*, onde se atopan as conclusións tiradas da análise dos resultados obtidos e se propoñen posibles ampliacións do proxecto que se escapan do alcance do mesmo.
- O Capítulo 9, *Glosario*, onde se recolle aquelas definicións e acrónimos que se consideraron de necesaria importancia clarificar e dispoñer á man do lector da memoria.
- O Apéndice A, *Manual de usuario*, onde se inclúe toda aquela información necesaria que precisa o usuario final para a instalación e utilización do aquí desenvolvido.
- Bibliografía, onde se achan as referencias bibliográficas que foron consultadas para a realización deste traballo así como referencias complementarias.

### 1.3. Rexistrado de imaxes hiperespectrais

Nesta terceira sección introdúcense aqueles termos básicos que se van manexar ao longo do documento e que son propios da contorna na que xira este traballo. Pretende ser unha extensión da introdución que nos aporte información adicional de interese.

Existen á día de hoxe unha grande variedade de sensores capaces de medir valores de refracción da luz en diferentes lonxitudes de onda [12]. Debido ao avance tecnolóxico destes sensores, este tipo de imaxes pódense e poderanse obter cada vez a menores custos que antano. A dispoñibilidade deste novo tipo de sensores fai que xorda un novo tipo de imaxe dixital. Unha imaxe dixital está formada por diferentes puntos chamados píxeles, mais nunha imaxe hiperespectral en cada píxel atopamos unha restra de valores que representan ao mesmo punto da superficie capturada en diferentes lonxitudes de onda. A cada píxel adoitáselle chamar, vector-píxel. Isto pódese ver graficamente na Figura 1.1 onde cada lámina da imaxe se corresponde cos valores nunha lonxitude de onda específica.

O procesado de captación deste tipo de imaxes por parte dos sensores basease no feito básico de que cada obxecto reflexa e absorbe a luz de diferentes maneiras dependendo da súa composición molecular e forma. O resultado da adquisición destes datos por parte do sensor poden ser representados por un cubo, como xa dixemos e se amosou nas Figuras 1.1 e 1.2. Podemos representar desta maneira cada píxel cunha localización de dúas dimensións, e cunha terceira dimensión

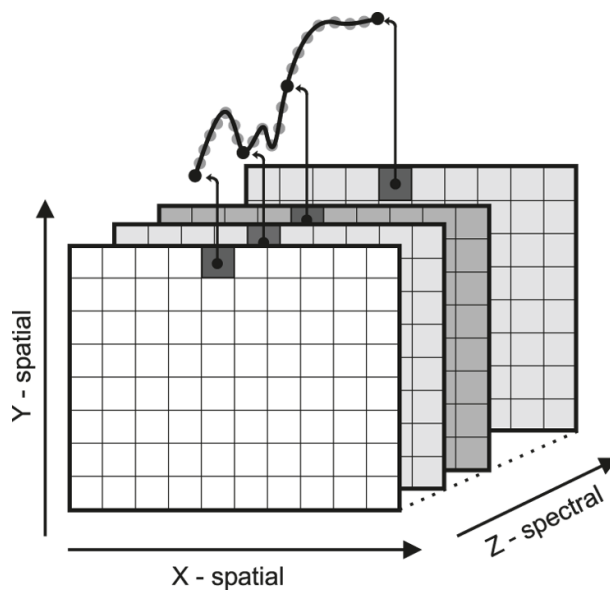


Figura 1.1: Cubo hiperespectral.

para situar en que banda da lonxitude de onda queremos facer referencia que se atopa. É por isto que a súa representación en memoria na implementación será unha matriz tridimensional de números.

Nunha imaxe dixital clásica en cor atopamos tres bandas espectrais: a vermella, cunha lonxitude de onda entre os 625nm e os 740nm; a verde, cunha lonxitude de onda entre os 520 e os 570nm e a azul, cunha lonxitude de onda entre os 440 e os 490nm. Polo contrario, nunha imaxe multispectral podemos atopar decenas de bandas espectrais e nunha hiperespectral podemos encontrar centos de bandas espectrais con lonxitudes de onda que varían dende o ultravioleta (valores inferiores de 400nm) ata o infravermello (valores superiores de 750nm). Isto supón que as imaxes hiperespectrais teñan centos de compoñentes fronte ás típicas tres cores das imaxes clásicas e fronte ao reducido número de bandas das multispectrais. Un exemplo máis real deste tipo de imaxes pódese ver na Figura 1.2.

Grazas á enorme cantidade de información coa que conta este tipo de imaxes o seu uso abrangue multitude de aplicacións [3]: clasificación de materiais, control de crecemento de cultivos, monitorización medioambiental, aplicacións en medicina, seguimento de catástrofes naturais, deteccións de cambios en imaxes sacadas en distintos instantes...

A pesar do potencial destas imaxes, a cantidade masiva de datos que conteñen poden chegar a ser un problema xa que restrinxen o seu ámbito a problemas que non teña requisitos en tempo real nin en espazo de almacenamento. Ademais,

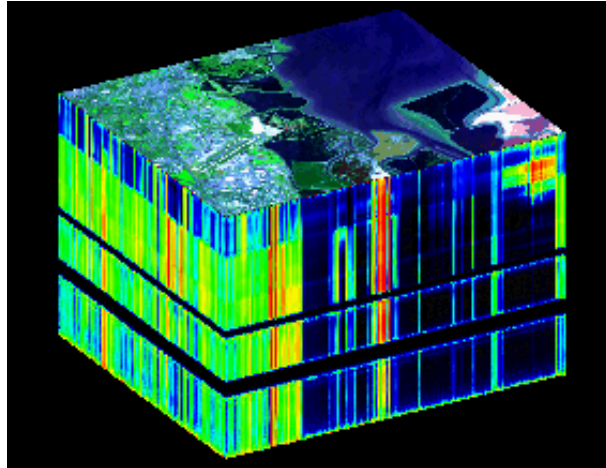


Figura 1.2: Cubo hiperespectral dunha imaxe do sensor AVIRIS.

precisariamos dunha importante capacidade de cómputo para procesar tantos datos. Para arranxar este problema unha primeira solución consiste en desenvolver técnicas e métodos capaces de extraer a información máis característica da imaxe hiperespectral co fin de quedarnos só cos datos verdadeiramente útiles reducindo así a súa dimensionalidade. Este tipo de procesos serán integrados, como xa se dixo, no proxecto como paso inicial antes de aplicar o algoritmo de rexistrado.

Existen dúas modalidades de rexistrado de imaxes, falando en canto á resolución das imaxes, que se estudan e proban indiferentemente nas investigacións deste campo. A primeira consiste en rexistrar imaxes con diferentes resolucións, é dicir, a imaxe de referencia contará cunha resolución  $M \cdot N$  mentres que a imaxe a rexistrar cunha resolución  $T \cdot R$ . A imaxe a rexistrar, a que se pretende aliñar, foi conseguida escalando a de referencia aumentando a resolución da imaxe como podemos ver na imaxe do centro da Figura 1.3. A hora de realizar o rexistrado é preciso igualar a resolución das dúas imaxes, polo que o que se fai é impoñer a resolución da imaxe máis grande á pequena, centrando a pequena nunha imaxe de resolución igual a da grande e enchendo con cor negra o espazo sobrante. Na Figura 1.4 podemos ver un exemplo de como quedarían as dúas imaxes de entrada antes de aplicarlle o algoritmo de rexistrado. Debido ao borde negro co que contará unha das imaxes, o rexistrado desta modalidade é moi doado debido a que basta coa detección deste borde. Ademais, este trátase dun caso moi artificial xa que o que se pretende é rexistrar imaxes sacadas co mesmo sensor e estes indiferentemente do zoom que teñan a imaxe sempre sairá coa mesma resolución. É por estas dúas razóns, sinxeleza de rexistrado deste tipo de imaxes e que é un caso non moi real, que este proxecto centrarase na segunda modalidade que se explica a continuación.



Figura 1.3: Bandas da imaxe hiperspectral da Universiade de Pavia [13]. a) Imaxe orixinal, de referencia (esquerda). b) Imaxe a rexistrar conseguida a partir da de referencia escalánda 4x, rotándoa 225° e aumentando a resolución (centro). c) Imaxe a rexistrar conseguida a partir da de referencia escalánda 4x, rotándoa 225° e sen aumentar a resolución (dereita).

A segunda modalidade consiste en que tanto a imaxe de referencia como a imaxe a rexistrar contan coa mesma resolución  $M \cdot N$ . Este trátase do caso máis real pois como se dixo un mesmo sensor tira as imaxes coa mesma resolución independentemente da distancia do obxectivo (zoom). Podemos observar o aquí explicado na Figura 1.3 onde a imaxe a rexistrar sería a da esquerda (a) e a da dereita (c). Este traballo centrarase nesta modalidade debido a que é un caso máis real que o anterior e que é máis complicado rexistrar imaxes deste formato.

Unha explicación máis técnica e detallada dos diferentes métodos empregados e algoritmos desenvolvidos realizarase no capítulo 6 de implementación.

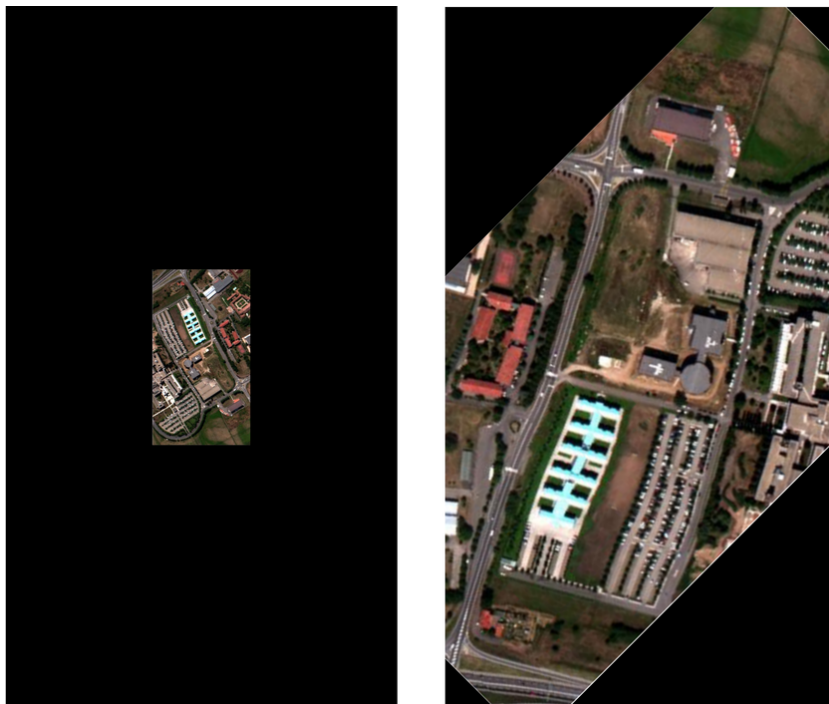


Figura 1.4: Imaxes de entrada do algoritmo logo de ser axustadas as súas resolucións. Neste caso, a imaxe de referencia (esquerda) tívose que aumentar a resolución para igualar a que se quere rexistrar (dereita).

# Capítulo 2

## Enunciado do Alcance do Proxecto

Neste apartado documéntanse aquelas características e límites do proxecto así como os métodos de aceptación e control do alcance. Establécese o traballo que debe realizarse e os produtos entregables que se realizarán.

### 2.1. Definición do Alcance do Proxecto

Neste proxecto preténdese inicialmente realizar unha investigación sobre a aplicación de métodos de rexistrado xa existentes para imaxes RGB a imaxes hiperespectrais pois o uso destes métodos non é directo debido a grande cantidade de datos deste tipo de imaxes.

Unha vez realizado o estudo descrito, realizaranse en C os algoritmos de rexistrado máis eficientes e probaranse diferentes posibilidades para aplicar os algoritmos de rexistrado ás imaxes hiperespectrais (técnicas de redución de dimensionalidade).

As mellores solucións incluíranse nun módulo de rexistrado para a aplicación *HypeRvieW* de análise e procesado de imaxes hiperespectrais. Desta maneira dotarase aos algoritmos e técnicas desenvolvidas dunha interface gráfica.

Unha descrición máis detalle dos obxectivos atópase na Sección de Obxectivos 1.1.

### 2.2. Criterios de aceptación do Proxecto

A solución ou as solucións atopadas deberán ser capaces de rexistrar imaxes hiperespectrais con éxito, identificando o factores de escala de ata polo menos 3x

para todo o abano de ángulos de rotación e desprazamentos posibles. Este factor 3x fíxase tendo en conta alcanzar en imaxes hiperespectrais o estado da arte en rexistrado de imaxes RGB. Máis alá do rexistrado, este traballo deberá analizar e explicar as técnicas desenvolvidas e probadas.

Para a aceptación do proxecto, os resultados das probas deseñadas (Capítulo 7) deberán cumprir o criterio anteriormente dito e deberán satisfacerse os requisitos que se reflicten na sección de Requisitos 4.1.

## 2.3. Entregables do Proxecto

De acordo cos Artigos 23, 24 e 25 do Regulamento de propostas de Traballos de Fin de Grao de Enxeñaría Informática <sup>1</sup> deberase entregar:

- Catro copias en papel da memoria
- Catro copias en formato dixital da memoria e da implementación

## 2.4. Exclusiones do Proxecto

Non se inclúe neste proxecto ningún tipo de mantemento da implementación entregada, nin ningún requisito adicional dos descritos na sección 4.1, nin ningún soporte ou formación a usuarios entendendo como suficiente o manual de utilización aquí incluído.

## 2.5. Restricións do Proxecto

A implementación publicarase baixo licenza GPL<sup>2</sup> e a documentación como Creative Commons<sup>3</sup> unha vez sexan publicados nunha revista da área.

Os algoritmos serán desenvolvidos para a súa utilización en contornas Unix.

## 2.6. Supostos do Proxecto

Supoñemos que o cliente dispón de imaxes hiperespectrais para as probas dos algoritmos e que se conta cun manual técnico para a integración das mellores solucións conseguidas como un módulo dentro do software *HypeRvieW*.

---

<sup>1</sup><http://www.usc.es/etse/files/u1/RegulamentoTFG-GrEI.CG.30xan2014.pdf>

<sup>2</sup><http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>

<sup>3</sup><http://creativecommons.org/>

# Capítulo 3

## Xestión do Proxecto

Neste apartado vanse determinar as diferentes fases para realizar unha adecuada xestión do proxecto. A xestión de proxectos consiste na aplicación de coñecementos, perfís, ferramentas e técnicas para definir e planificar as actividades que permitan cumprimentar os obxectivos e necesidades do proxecto.

Trataremos neste capítulo temas relacionados coa xestión da configuración, coa xestión do alcance e a metodoloxía de desenvolvemento elixida, a xestión temporal ou planificación de todas as tarefas do proxecto, a estimación de custos e a análise e xestión de riscos.

Seguiranse as pautas e aspectos definidos no libro PMBOK [14].

### 3.1. Xestión da Configuración

A xestión da configuración [15] é un proceso cuxo principal propósito é establecer e manter a integridade dos produtos de traballo a través de:

- A identificación dos elementos ou produtos que van ser controlados.
- A definición dun procedemento para o control de produtos.
- O rexistro e/ou informe do estado dos produtos.
- As auditorías de configuración.

#### 3.1.1. Sistema de almacenamento

Co fin de evitar a perda da documentación e do código fonte debido a fallos humanos ou fallos tecnolóxicos establecéronse uns sistemas de almacenamento que nos garanten ter, como mínimo, sempre unha copia en local e outra noutro lugar externo.

### Xestión do código fonte

A xestión da configuración do código fonte levarase a cabo empregando a ferramenta Dropbox . Este é un servizo de almacenamento de ficheiros multiplataforma na nube. Permitiranos en todo momento manter unha copia de seguridade externa do código fonte na súa última versión así como a súa rápida sincronización nos diferentes equipos onde se traballe no proxecto. Dropbox permítenos recuperar versións previas de cada ficheiro, clasificándoas por data e hora de modificación. A existencia dun bo cliente de escritorio sincronizado co sistema de ficheiros de case calquera sistema operativo foi decisivo a hora de elixir esta ferramenta fronte a outras como Google Drive onde a versión para sistemas operativos Linux deixa bastante que desexar.

Isto a súa vez estará dentro dun repositorio Git, o cal é un software de código aberto que xa está integrado no sistema operativo que se vai empregar. O seu uso será directo dende a terminal de comandos. Dentro de cada repositorio contaremos con unha rama *master* onde só se poderán subir versións operativas e funcionais do código, é dicir, só se permitirá facer un *push* nese caso. Cada vez que se realice un *commit* deberá ir perfectamente documentado por se é preciso recuperar algunha versión anterior ou reverter un cambio. Para versións aínda non en funcionamento contaremos coa copia en Dropbox. Crearanse os *branch* necesarios co fin de asegurar unha maior integridade dos datos.

### Xestión da documentación

Para evitar unha perda da documentación por fallo de hardware empregouse tamén o servizo na nube Dropbox. Ademais realizarase semanalmente un ficheiros comprimido con todos os datos dispoñibles que será transferido a un sistema de almacenamento externo (un lapis de memoria, neste caso) e nomearase coa seguinte nomenclatura:

CopiaSeguridade\_<DD>\_<MM>\_<AAAA>

onde en <DD> escribiremos o día correspondente, en <MM> o mes e en <AAAA> o ano.

### Control de versións

O control de cambios levarase, como xa se explicou no punto anterior, a través das ferramentas descritas. Dispoñerase a través do Dropbox de versións etiquetadas por data e hora tanto do código fonte como da documentación. Ademais, o código fonte atópase nun repositorio Git onde só pode haber versións operativas (que compilen e se poidan executar) e debidamente etiquetadas cunha descrición suficiente por se é necesario recuperar algún dato ou reverter cambios. Pola parte da documentación como xa se dixo contaremos cunha copia semanal en soporte físico externo ao ordenador de traballo.

### 3.1.2. Control de cambios

Durante o desenvolvemento do traballo poderán xurdir necesidades de cambios en calquera elemento da configuración, por exemplo no deseño ou implementación dun algoritmo, polo que para a súa correcta xestión empregárase a ferramenta de incidencias incluída no servidor Git empregado, Bitbucket, do seguinte xeito:

- **Solicitud de cambio:** Para solicitar un cambio creárase unha incidencia no sistema de incidencias proporcionado por Bitbucket. Nela debemos especificar a que compoñente afecta o cambio (documentación, algoritmo FFT, algoritmo gradientes ou algoritmo MLFFT), un título, unha descrición onde se explicará con maior detalle que elemento da compoñente seleccionada afecta, unha prioridade (alta, media, baixa) e o tipo de incidencia que deberá ser sempre *proposta de cambio*. Este cambio será asignado por defecto ao autor do traballo.
- **Avaliación do cambio:** Despois de enviar a solicitude de cambio esta terá por defecto un estado de *novo*. Os directores do proxecto e o autor avaliarían a viabilidade da solicitude decidindo se se realizará ou non. Se se realiza cambiaírase o estado a *en espera* e se non ao de *inválido*.
- **Realización do cambio:** Deberanse levar a cabo os cambios marcados como *en espera* e unha vez feitos cambiarlle o estado a *resolto*.

## 3.2. Xestión do Alcance

A Xestión do Alcance do Proxecto inclúe todos aqueles procesos necesarios para asegurar que o proxecto incluírá todo o traballo requirido, e só o traballo requirido, para completar o proxecto satisfactoriamente [14].

Nesta sección analízanse diferentes metodoloxías de desenvolvemento co fin de escoller a que mellor se adapte ao traballo e que nos permita completalo con éxito. A continuación expoñeráse a Estrutura de Descomposición do Traballo.

### 3.2.1. Metodoloxía de desenvolvemento

A metodoloxía de desenvolvemento ou ciclo de vida define as fases que conectan o inicio dun proxecto co seu fin.

- Que traballo técnico se debe facer en cada fase.
- Cando se deben xerar os produtos entregables en cada fase e como se revisa, verifica e valida cada produto entregable.

- Quen está involucrado en cada fase.
- Como controlar e aprobar cada fase.

Unha escolla incorrecta do ciclo de vida podería causar sobrecostos debido a unha planificación que non se adapta ao proxecto, podería causar unha duración maior da esperada debido a especificacións ambiguas ou unha mala análise dos riscos entre outras cousas. É por isto que se decidiu realizar unha análise de distintos ciclos de vida para así elixir o que mellor se adapte ao proxecto.

O **ciclo de vida en cascada** é o máis antigo dos empregados en enxeñaría do software e foi creado a partir do ciclo convencional dunha enxeñaría. Este tipo de ciclo esixe un enfoque sistemático e secuencial de desenvolvemento do software, avanzando a través das fases secuenciais. En outras palabras, o inicio dunha fase ou etapa debe esperar á finalización da anterior. É por isto que se deben dispoñer dos requisitos do sistema dende o primeiro momento e non é ata o final do ciclo cando se consegue unha versión operativa do software, polo que é nas derradeiras fases cando se detectan a maioría dos fallos. Esta metodoloxía non serve para este proxecto, pois son probables cambios rápidos das necesidades e técnicas segundo os resultados que se vaian obtendo e o proxecto é demasiado grande e está dividido en módulos independentes e precisaremos de ir asegurando funcionalidades por entregas.

O **ciclo de vida en espiral** foi proposto inicialmente por Barry Boehm. É un modelo evolutivo que combina as vantaxes do ciclo en cascada e de modelos baseados na realización de prototipos. Ao ser un modelo evolutivo pode ir adaptándose e aplicarse ao longo de todo o ciclo de vida. O software vaise construíndo nunha serie de versións incrementábeis. Nas primeiras iteracións este podería ser un prototipo ou un modelo básico do produto. Nas derradeiras iteracións teremos cada vez versións máis completas do sistema. O modelo divídese en actividades chamadas *rexións de tarefas*. Hai diferentes variantes do modelo con distintos números de rexións, pero o normal é entre tres e seis. Algunhas destas rexións poderían ser: a definición de obxectivos, onde se establecen os obxectivos do proxecto, alternativas e restricións; a análise de riscos, a grande novidade deste ciclo de vida; a rexión de desenvolvemento e validación, onde se produce a xeración dun entregable en función dos obxectivos de ese ciclo da espiral e a revisión e planificación, onde todas as persoas que teñen relación co produto revisan o produto desenvolvido nese ciclo e deciden se se continua ou non co desenvolvemento e se deseñan os plans para o seguinte ciclo.

Este trátase dun modelo moi apto para proxectos moi complexos como pode ser desenvolver un sistema operativo ou para desenvolvemento de sistemas críticos ou con altos riscos. Require considerar riscos técnicos en todas as etapas do proxecto polo que se precisa de persoal experto neste tema. Un risco non detectado

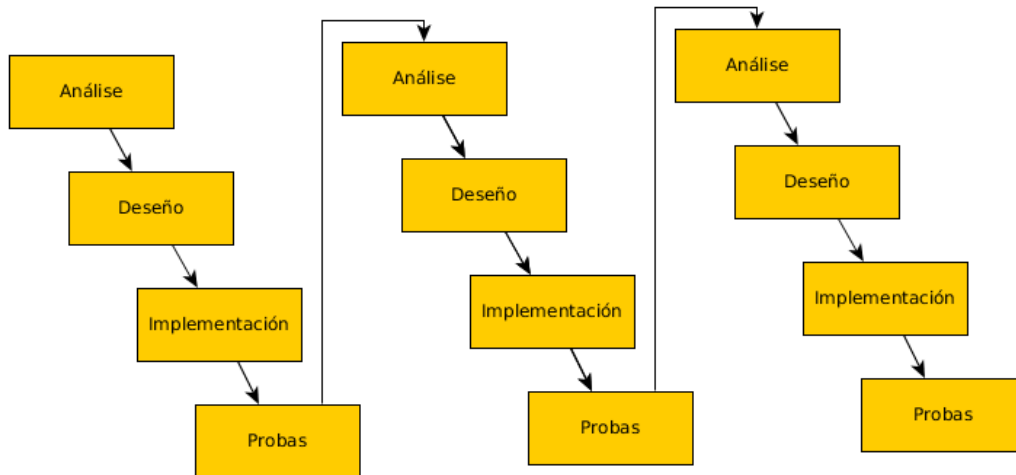


Figura 3.1: Exemplo dun ciclo iterativo

a tempo pode supoñer un custo similar a un requisito mal definido no modelo en cascada.

Ao non definirse este proxecto como moi complexo nin a necesidade dunha tan alta análise de riscos, e sendo este un modelo tan difícil de controlar considerase que non tería moito sentido a súa aplicación deste modelo.

O **ciclo de vida iterativo incrementábel** (Figura 3.1) é un modelo evolutivo que entende ao software como unha integración de resultados sucesivos e non como unha unidade monolítica. Xorde a partir de diferentes metodoloxías relacionadas coa programación extrema e con estratexias áxiles de desenvolvemento de software. Os ciclos de vida iterativos e incrementábeis son aqueles nos cales dentro de cada fase se repiten de xeito intencionado unha ou máis actividades do proxecto. Ao contrario que o ciclo en cascada mediante incrementos obtense un produto operativo en cada iteración. Nos primeiros incrementos os produtos obtidos son versións incompletas pero totalmente funcionais. En cada incremento realízanse as diferentes etapas de desenvolvemento do software, comezando pola análise, deseño, implementación e finalmente as probas e a aceptación do sistema. Ademais este ciclo permite incrementar a retroalimentación, podendo aproveitar recursos xa adquiridos en iteracións anteriores. Ao final de cada iteración o equipo pode analizar e mellorar o proceso do seu traballo en función da experiencia xa obtida. Con esta información é posible planificar cambios necesarios para aumentar a produtividade e a calidade das primeiras iteracións.

Na primeira fase realizarase unha análise global que nos permita ver unha aproximación de alto nivel do sistema pero que se concretará e detallará en maior medida en cada iteración. Permítenos diminuír os riscos dende o principio e xestionar mellor a complexidade do proxecto. Permítenos tamén coñecer o progreso

real do proxecto dende o seu comezo e extrapolar si se vai finalizar na data prevista.

Debido a que a idea é desenvolver un primeiro algoritmo operativo e despois realizar sucesivas versións ou variantes engadindo novas ideas ou técnicas, polo que moitos recursos serán re-aproveitados pero moitos outros deberán ser deseñados concretamente para esa versión, e que non se terá un coñecemento total do alcance do proxecto nin das ferramentas e coñecementos a empregar, chégase a conclusión de que este é o modelo de desenvolvemento que máis se adapta a este traballo.

### 3.2.2. Estrutura de Descomposición do Traballo

A Estrutura de Descomposición do Traballo (EDT) é unha descomposición xerárquica do traballo que será realizado polo equipo do proxecto para lograr os obxectivos do proxecto e crear os produtos entregables requiridos. A EDT é unha ferramenta fundamental da xestión de proxectos pois organiza e define o seu alcance total, é dicir serve para verificar que o proxecto inclúe todo o necesario.

Para creala hai que subdividir o traballo do proxecto en cachiños de traballo máis pequenos e fáciles de manexar, conseguindo así que cada nivel descendente da EDT represente unha definición cada vez máis detallada de traballo.

A EDT serve como base para realizar a planificación e para crear o diagrama de Gantt que se atopa na Sección 3.3.

Na Figura 3.2 represéntase a EDT deste traballo. Cabe dicir que esta EDT foi modificada despois da realización da segunda iteración do proxecto. Isto é debido ao tipo de metodoloxía escollida xa que nos permite un desenvolvemento flexible adecuado ao tipo de proxecto do que se trata. Ao inicio do proxecto tíñase unha estrutura base de descomposición do traballo ademais do deseño das dúas primeiras iteracións. A terceira e cuarta iteracións foron deseñadas e contempladas ao completar a segunda iteración tras analizar os resultados obtidos e vendo que ideas e modificacións poderían conseguir un mellor produto. A quinta e derradeira iteración consistiu na inclusión das mellores solucións na ferramenta *HypeRvieW* para así facilitar o uso de estas a través dunha interface gráfica. Esta iteración foi levada a cabo tras observar que a planificación estimada no anteprojecto foi optimista e dispoñiamos de tempo para realizala.

## 3.3. Xestión do Tempo

Nesta sección estímase o tempo necesario para cada unha das tarefas do proxecto. A Xestión do Tempo do proxecto inclúe os procesos necesarios para lograr

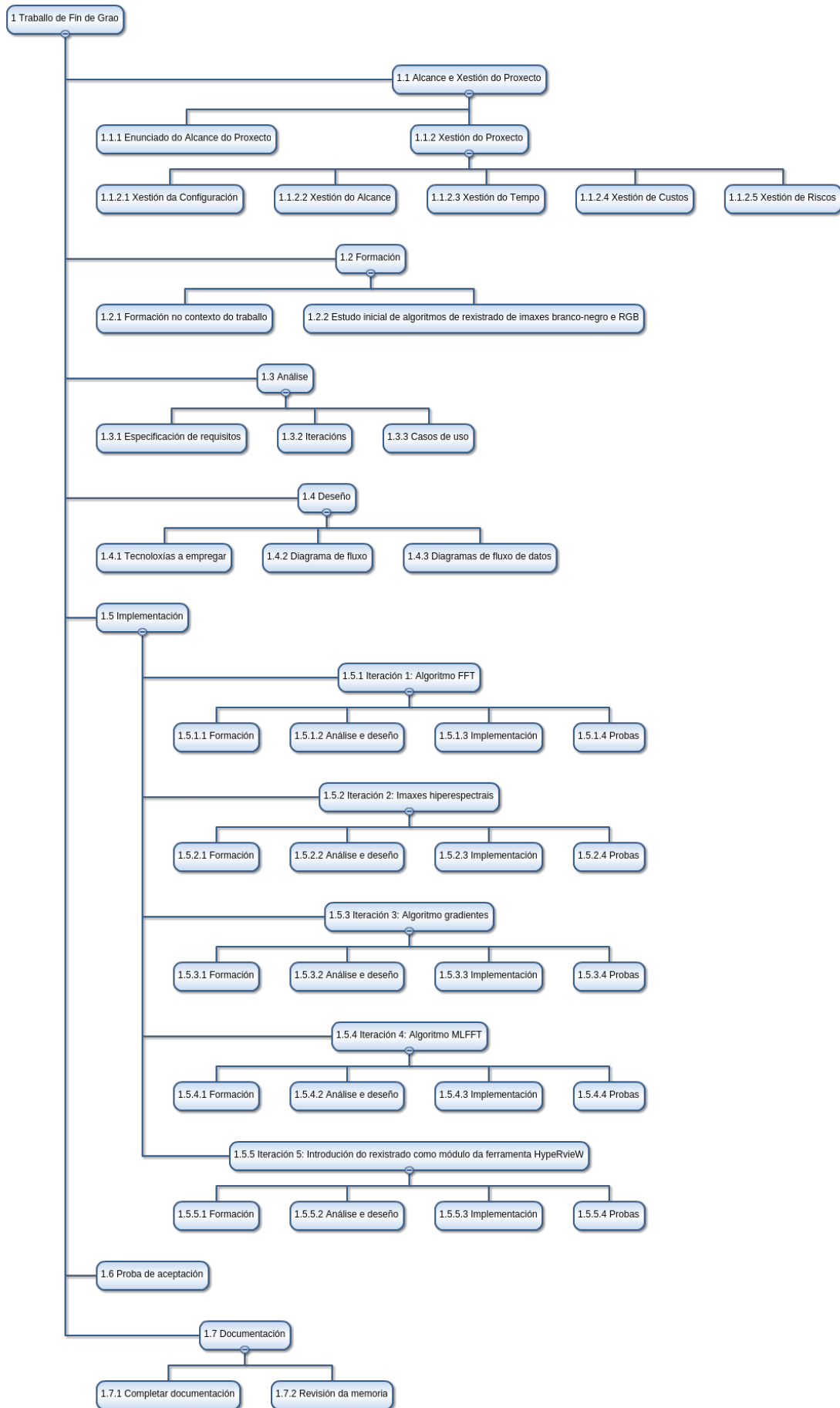


Figura 3.2: EDT

a conclusión do proxecto a tempo así como aqueles procesos para xestionalo adecuadamente. Para crear esta planificación baseámonos na EDT creada na Xestión do Alcance e empregáronse ademais as seguintes ferramentas e técnicas:

- **Xuízo de expertos:** Os directores do proxecto contan cunha ampla experiencia e habilidade en desenvolvemento de proxectos similares a este, polo que esta información histórica de destrezas anteriores poden ser aportadas a hora de definir as actividades e de realizar a planificación.
- **Patrón de actividades:** Unha lista de actividades dun proxecto anterior realizado na materia de Prácticas Externas así como as listas xeradas en proxectos de prácticas en materias relacionadas coa xestión do software poden ser empregadas para definir e crear o cronograma. Estas listas de actividades inclúen nalgún dos casos a cantidade de horas de esforzo dedicadas, información descritiva e riscos identificados que nos permitirán crear unha mellor planificación e reducir a cantidade de horas de esforzo implicadas nesta tarefa.
- **Reunión do equipo:** O equipo realizará varias reunións para discutir e crear o cronograma do proxecto.

Na Figura 3.3 amósase a planificación temporal do desenvolvemento deste proxecto. Dedicóuselle cada día laboral da semana 4h diarias debido a compatibilización coas aulas universitarias e coa materia de Prácticas Externas. Por iso cando na planificación amosada na Figura 3.3 se fala de **1 día, fálase de 4h**. Comézase o proxecto fixando o alcance do mesmo e establecendo como se xestionará este. A continuación realizarase unha etapa de formación co fin de aproximar e formar a contorna de traballo ao desenvolvedor. Ademais estudarase, como xa se dixo, algoritmos de rexistrado xa existentes para imaxes *clásicas* co fin de poder realizar unha planificación, análise e deseño inicial. Unha vez realizado a análise e o deseño tal e como se especificará en máis detalle en videiras seccións comezarase coa implementación que se realizará en diferentes iteracións descritas na Sección 4.2.

Estas iteracións por natureza do modelo de ciclo de vida escollido (Sección 3.2.1) foron modificadas segundo se foi desenvolvendo o proxecto. Inicialmente contábase coa planificación das dúas primeiras, as seguintes foron deseñadas a partir dos resultados acadados.

A duración total do proxecto foi de **411 horas**, iniciándose o 6 de abril 2015 e finalizando o 16 de xuño dese mesmo ano.

Por outra banda, é interesante comparar a planificación estimada no anteprojecto (Cadro 3.1) e a real (Figura 3.3). É difícil comparar directamente estas

planificacións debido á metodoloxía escollida na planificación real xa que en cada iteración se están realizando pequenos ciclos por todas as etapas de desenvolvemento. Ademais a planificación do anteprojecto estimouse en semanas, con 18 horas de dedicación semanal, e finalmente a dedicación na planificación real foi de 4 horas diarias. Por estas razóns decidiuse realizar un cadro resume (Cadro 3.2) que compare ambos cronogramas en horas e que ademais condense as horas dedicadas en cada iteración na súa fase pertencente: formación, análise, deseño, implementación ou probas. No caso de análise e deseño que nas iteracións forman unha mesma etapa e polo tanto estimáronse conxuntamente na planificación real, dividiuse equitativamente as horas dedicadas a cada fase co fin de sumarllas a cada fase individual.

Pódese ver que a estimación do anteprojecto era pesimista en canto a análise e deseño e optimista de cara a implementación, probas e documentación pois hai unha pequena diferenza nesas fases. As fases de análise e deseño precisaron de menos horas das estimadas debido a retroalimentación da que nos provén a metodoloxía escollida, podendo aproveitar grande parte do traballo realizado nas anteriores iteracións. Estas horas aforradas foron empregadas na consecución dunha maior calidade dos algoritmos e técnicas realizadas de aí a ese pequeno incremento en implementación e probas. Outra das cousas a ter en conta é que o investigador/desenvolvedor autor do proxecto nunca tivera antes un contacto con esta área de investigación. Finalmente vemos que tamén se lle dedicou máis horas a redacción e completación da memoria debido fundamentalmente a explicación e a escritura técnica dos algoritmos e conceptos matemáticos.

A pesar desas pequenas oscilacións **a planificación foi correcta**, xa que coincide coa estimación total do anteprojecto e mantense dentro do estipulado para un traballo de fin de grao (401,25 horas de traballo autónomo e 11,25 horas de traballo presencial). É máis, a estimación foi optimista xa que se realizou unha quinta iteración a maiores coa que non se contaba no alcance inicial do proxecto.

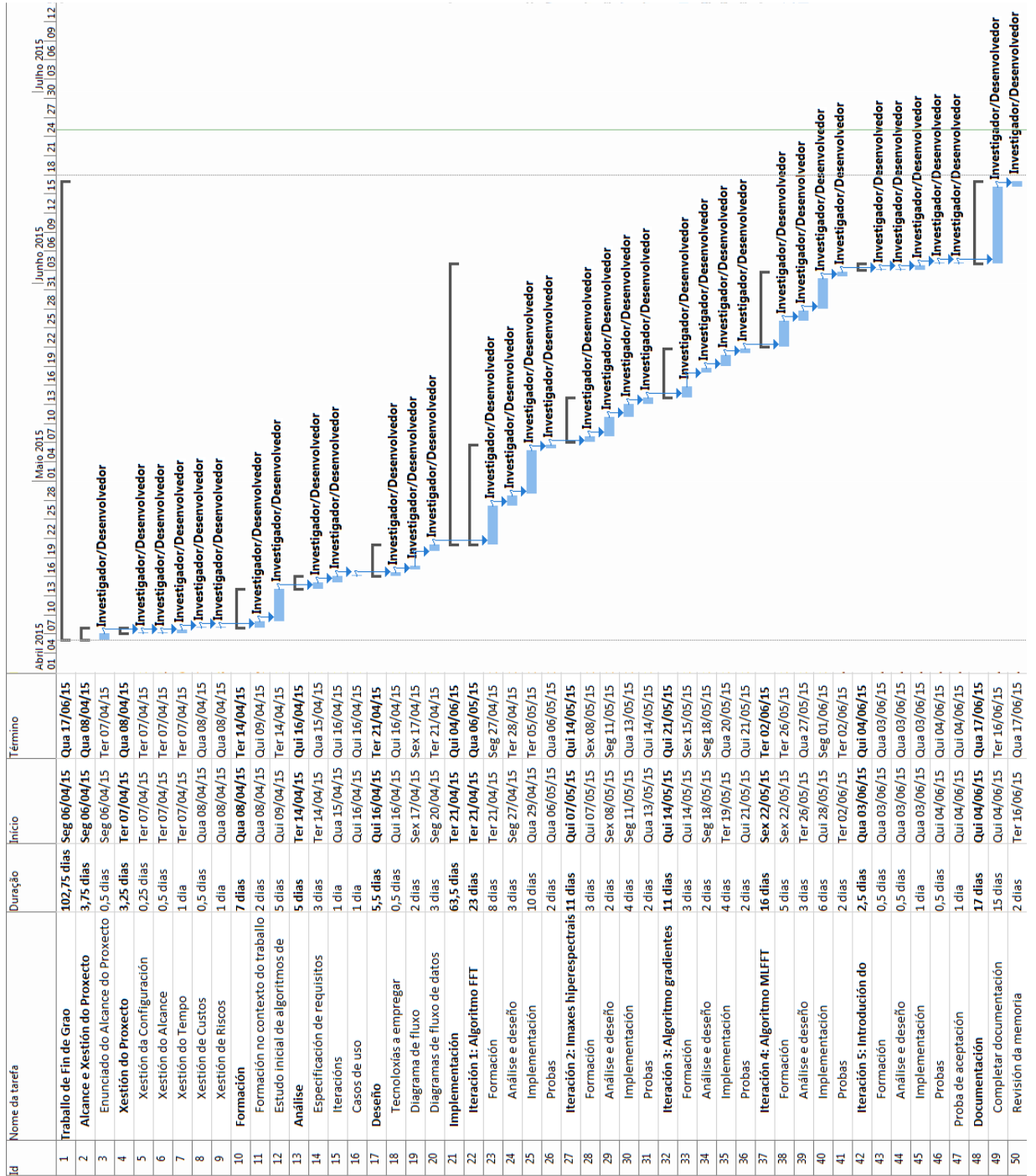


Figura 3.3: Planificación mediante un diagrama de Gantt.

Fase	Estimación temporal (en semanas)
<b>Alcance e planificación</b>	<b>0,8</b>
Alcance do proxecto	0,4
Planificación do proxecto	0,4
<b>Formación</b>	<b>6</b>
Estudo de algoritmos de rexistrado de imaxes branco-negro e RGB	6
<b>Análise</b>	<b>4</b>
Análise de diferentes algoritmos de rexistrado baseados en FFT	1,75
Análise de métodos de rexistrado de imaxes para hiperespectral	1,75
Especificación de requisitos	0,5
<b>Deseño</b>	<b>3</b>
Deseño dos métodos de rexistrado baseados en FFT	1,5
Deseño das técnicas para aplicar os métodos de rexistrado a hiperespectrais	1,5
<b>Implementación</b>	<b>5</b>
Implementación dos métodos de rexistrado baseados en FFT	2,5
Implementación das técnicas para aplicar os métodos de rexistrado a hiperespectrais	2,5
<b>Probas</b>	<b>1,5</b>
Probas funcionais	1
Probas de integración	0,5
<b>Documentación</b>	<b>2,5</b>
Documentación do código	0,5
Redacción da memoria	2
<b>TOTAL</b>	<b>22,8</b>

Cadro 3.1: Planificación estimada no anteproxecto.

Fase	Estimación temporal (en horas)	
	Anteproxecto	Proxecto
Alcance e planificación	14,4	15
Formación	108	106
Análise	72	41
Deseño	54	43
Implementación	90	100
Probas	27	38
Documentación	45	68
<b>TOTAL</b>	<b>410,4</b>	<b>411</b>

Cadro 3.2: Comparación da planificación estimada no anteproxecto coa planificación real (en horas).

### 3.4. Xestión dos Custos

Realizar unha correcta Xestión dos Custos implica levar a cabo unha planificación, estimación, preparación do presuposto e control dos custos. Ten como obxectivos realizar unha estimación dos custos necesarios para levar a cabo o proxecto, servir de modelo para saber como xestionar os custos ao longo do proxecto e como obxectivo principal que o proxecto se poida completar dentro do presuposto aprobado.

Para realizar a estimación de custos empregaranse as seguintes técnicas:

- **Determinación de Tarifas de Custos de Recursos:** As persoas que están encargadas da preparación das estimacións deben coñecer as tarifas de custos unitarios, tales como as dos custo relativos ao persoal por hora e ao custo do material unitario, correspondentes a cada recurso para así estimar os custos da actividade do cronograma. Reunir cotizacións é un método de obter tarifas que se empregara neste traballo.
- **Estimación Ascendente:** Técnica que implica estimar o custo de paquetes de traballo individuais ou actividades do cronograma individuais co nivel máis baixo de detalle. Este custo logo resúmese en niveis superiores para fins de información e seguimento.
- **Software de Xestión de Proxectos:** O software de xestión de proxectos, como por exemplo, as follas de cálculo computerizadas empregadas en materias como Xestión de Proxectos, son moi utilizados para asistir no proceso de estimación de custos. Axúdannos a simplificar o proceso.

Debido a que este traballo se trata dun Traballo de Fin de Grao, os custos manexados nesta sección serán teóricos.

- Debido a condición de estudante da Universidade de Santiago de Compostela o autor deste traballo empregará a conexión a Internet que esta universidade brinda a súa comunidade.
- Considerouse que non se dispón nin do software nin do hardware necesario para desenvolverlo proxecto.
- Os gastos de consumibles tales como papel, bolígrafos, impresión de documentación, etcétera, consideraranse gastos imputables do proxecto e non correran a cargo do autor.
- Debido a que se trata dun Traballo de Fin de Grao, os custos de persoal serán teóricos.

Os custos especificados dividiránse en tres grupos:

- **Custos relativos ao persoal:** Inclúense neste grupo todos os gastos que xurdan de recursos humanos.
- **Custos relativos ao material:** Inclúense nesta categoría todos os gastos derivados do uso e/ou compra de material necesario para desenvolver o proxecto.
- **Custos relativos ao software:** Inclúense neste apartado todos os gastos derivados do uso e/ou compra de software necesario para realizalo proxecto.

#### 3.4.1. Custos relativos ao persoal

Neste apartado vanse detallar os custos correspondentes aos recursos humanos que participan no desenvolvemento do proxecto. Diferéncianse dous roles, directores do proxecto e autor (investigador/desenvolvedor).

Para calcular o salario bruto dun traballador debemos ter en conta a base de cotización dependendo do grupo de cotización onde se sitúe o empregado, as continxencias comúns, o tipo de desemprego e o pago ao Fondo de Garantía Social (FOGASA). No Cadro 3.3 podemos ver o salario bruto para cada un dos roles anteriores segundo o Estudo Salarial do Sector TIC de Galicia 2014-2015 [16].

Rol	Salario bruto
Xefe(a) de proxecto (con máis de 8 anos de experiencia)	45.000 €
Investigador/Desenvolvedor Novel	18.000 €

Cadro 3.3: Salario bruto.

Tomando tamén como referencia os datos que nos brinda a Seguridade Social [17] podemos especificar as variables a ter conta para calcular os custos de persoal:

- **Grupo de cotización:** Todos os roles que participan no proxecto atópanse no grupo 1 de cotización.
- **Base de cotización:** A base de cotización mínima para o grupo 1 é de 1.056,90 € e a máxima de 3.606,00 €.
- **Continxencias comúns:** A empresa paga polo empregado o 23,60 % sobre a base da cotización.
- **Desemprego:** Supoñendo que se trata dun contrato fixo estaríamos no tipo xeral de desemprego polo que a empresa paga o 5,50 % sobre a base da cotización.
- **FOGASA:** Correspóndelle a empresa pagar 0,20 % polo empregado sobre a base de cotización.
- **Formación profesional:** Correspóndelle a empresa pagar 0,60 % polo empregado sobre a base de cotización.

A modo resume a cotización total é de 29,9 % que deriva da suma das cotizacións anteriormente listadas. Atendendo a isto o custo para a empresa por cada tipo de recurso humano pódese ver no Cadro 3.4. Como se pode apreciar todos os roles teñen a base de cotización entre o mínimo e máximo establecido pola lei para o grupo de cotización 1.

Rol	Salario bruto	Salario Bruto Mensual	Cotización (29,90 %)	Custo Mensual para a empresa
Xefe(a) de proxecto	45.000,00 €	3.750,00 €	1.121,25 €	4.871,25 €
Investigador / Desenvolvedor Novel	18.000,00 €	1.500,00 €	448,50 €	1.948,50 €

Cadro 3.4: Custo para a empresa por rol de recurso humano.

Para calcular o custo por horas fixamos a xornada laboral de 8h diarias e 22 días traballados cada mes. Atendendo a estas datos calculouse este custo e pódese ver no Cadro 3.5.

Rol	Custo mensual	Custo por hora
Xefe(a) de proxecto	4.871,25 €	27,68 €
Investigador/Desenvolvedor Novel	1.948,50 €	11,07 €

Cadro 3.5: Custo para a empresa por rol de recurso humano en horas.

Unha vez teñamos calculadas as horas de dedicación de cada rol e tendo en conta de que o traballo conta con dous directores de proxecto e un investigador/-desenvolvedor calculamos os custos resultantes:

**Director1:** Inverte no traballo 25 horas (correspondentes a titorias e reunións), a 27,68 € á hora suman 692,00 €.

**Director2:** Inverte no traballo 25 horas (correspondentes a titorias e reunións), a 27,68 € á hora suman 692,00 €.

**Investigador/Desenvolvedor:** Dedícalle ao traballo 411 horas, a 11,07 € á hora suman 4.549,77 €.

Isto fai un total de **5.933,77 €** de custos relativos ao persoal.

### 3.4.2. Custos relativos ao material

#### Hardware

Os únicos elementos hardware empregados para o desenvolvemento deste traballo foi un ordenador de sobremesa Dell XPS 8700 cun procesador Intel Core Intel Core i7-4790 con 12GB de memoria RAM e un monitor da mesma marca modelo P2414Hb. O prezo de compra do ordenador foi de 860,00 € mentres que o do monitor foi de 215,76 €. A vida útil dun equipo ou monitor adoita estar entre os 4 anos e os 6 anos, sendo a media 5 anos. Sabendo isto vaise calcular o custo de adquisición por uns determinados anos correspondentes ás súas vidas útiles, pois seguramente se empreguen noutros fins ademais que neste proxecto. Para isto empregamos a seguinte formula:

$$\text{depreciación anual} = \frac{\text{prezo dos dispositivos (€)}}{\text{anos de vida útil}} = \frac{860 + 215,76(\text{€})}{5} = 215,15 \text{ €/ano.} \quad (3.1)$$

Debido a que o traballo durará menos de un ano vaise calcular o custo en meses, polo que bastará con dividir a depreciación anual polas meses que ten o ano,

$$\text{depreciación mensual} = \frac{\text{depreciación anual}}{12 \text{ meses/ano}} = \frac{215,15}{12} = 17,93 \text{ €/mes.} \quad (3.2)$$

Xa que o proxecto ten unha duración de 2,25 meses, o custe unitario do hardware ven de multiplicar 2,25 meses  $\cdot$  17,93 e é igual a **40,34 €**.

### Consumo eléctrico

Tanto o ordenador como o monitor precisan da corrente eléctrica para funcionar. Un ordenador non consume a potencia nominal que se indica na súa fonte, esta é a potencia máxima que pode aportar. Os ordenadores e os monitores teñen diferente consumo dependendo no estado no que se atopen: en uso, en repouso ou apagado. O que debemos coñecer é a enerxía media consumida, é dicir, interézanos coñecer a enerxía consumida en uso na meirande parte do tempo. O ordenador de sobremesa Dell XPS 8700 empregado para a realización do proxecto ten un consumo en uso de **129 W**<sup>1</sup> [18]. Por outra parte, o monitor ten un consumo medio de **18,96 W** [19].

O prezo medio do kilovatio-hora en España consultado a día 8 de xuño de 2015 é de **0,12813 €/kWh** [20]. Sabendo que o consumo total dos dous dispositivos é de **147,96 W**, que o proxecto durou **411 horas** (Figura 3.3) e que a maiores o ordenador quedaría acendido realizando probas aproximadamente 7 días (168 horas) calculamos o consumo total.

$$\text{consumo total} = 0,14796 \text{ kW} \cdot (411 + 168) \text{ h} = 85,66884 \text{ kWh.} \quad (3.3)$$

$$\text{prezo} = 85,66884 \text{ kWh} \cdot 0,12813 \text{ €/kWh} = 10,98 \text{ €}. \quad (3.4)$$

Pódese concluir entón que o custo da electricidade por parte do hardware é de **10,98 €**. Non se tiveron en contra outros posibles consumos eléctricos por ser de moi mínimo o custo, como pode ser o consumo das bombillas do espazo de traballo.

### Outros materiais

A continuación detállanse aqueles outros materiais que foron necesarios para desenvolver e completar o proxecto:

---

<sup>1</sup>Enténdese que hai unha errata e sobra a coma decimal na páxina consultada. O valor correcto é 129 W e non 12,9 W en potencia consumida en uso.

- Bolígrafos e lapis: 2,00 €.
- Paquete de folios: 4,00 €.
- Impresión memoria do proxecto (4 copias): 120,00 €.
- Soporte óptico (4 copias): 3,00 €.

A suma de todos estes materiais fan un total de **129,00 €**.

### 3.4.3. Custos relativos ao software

O proxecto foi desenvolvido en todas as súas fases mediante software gratuíto polo que non se contemplan custos nesta categoría.

Nome do software	Custo (horas)
Project Libre	0 €
Ubuntu	0 €
Libreoffice Calc	0 €
LaTeX	0 €
Sublime Text	0 €
Librería FFTW	0 €
yEd	0 €
WBSTool	0 €

Cadro 3.6: Software empregado durante todo o proxecto.

### 3.4.4. Custos totais

Podemos observar no Cadro 3.7 o resumo de custos deste proxecto. Deste xeito conclúese que o custo total do proxecto é de **6.114,09 €**.

Tipo de custos	Custo (€)
Custos relativos ao persoal	5.933,77 €
Custos relativos ao material	180,32 €
Custos relativos ao software	0 €
<b>TOTAL</b>	<b>6.114,09 €</b>

Cadro 3.7: Custo total do proxecto

## 3.5. Xestión de Riscos

A Xestión de Riscos inclúe todos aqueles procesos relacionados coa planificación da xestión de riscos, a súa identificación e a análise de riscos así como as

resposta aos riscos, e o control e seguimento de estes procesos durante o proxecto. Os obxectivos desta xestión é aumentar a probabilidade e o impacto de eventos positivos e diminuír a probabilidade e o impacto dos eventos negativos de cara ao finalizo proxecto con éxito.

Defínese risco como unha condición ou evento incerto que si se produce ten un efecto positivo ou negativo sobre polo menos un obxectivo do proxecto [14]. Poden afectar á calendarización, aos custos, ao alcance, á calidade, entre outros posibles obxectivos.

A continuación procederáse a explicar como se identificaron os riscos, como serán analizados e tamén como se mitigará a probabilidade de aparición e se se dera o caso que respostas previstas se teñen preparadas para aqueles riscos que se consideraron prioritarios.

### 3.5.1. Identificación de riscos

Para a identificación dos posibles riscos empregáronse as seguintes ferramentas e técnicas:

- **Revisión de documentación:** Consiste en examinar todo tipo de documentación de proxectos anteriores para así recoller riscos comúns que poidan afectar a todo tipo de proxectos e que se nos poden pasar por alto, riscos non formulados en anteriores proxectos pero que si apareceron e que neste pódense xa ter en conta debido a que foron rexistrados, etc.
- **Tormenta de ideas:** A finalidade desta técnica é obter unha lista completa de todos os posibles riscos do proxecto. Consiste en realizar unha reunión onde todos os membros do equipo xeran ideas acerca de posibles riscos que pode ameazar ao proxecto. Inicialmente anótanse todos eles, máis tarde xa serán categorizados, avaliados (impacto e probabilidade) e filtrados.
- **Análise mediante listas de control:** Consultarase unha lista de control que foi desenvolvida baseándose en información histórica e no coñecemento que se foi acumulando de proxectos anteriores e doutras fontes de información. Empregarase a lista de control [21] aportada polos profesores da materia Xestión de Proxectos que foi desenvolvida pola Universidad de Castilla- La Mancha (UCLM). Trátase dunha lista moi completa con 111 riscos máis frecuentes en proxectos software ordenados por categorías.

Para a análise dun risco debemos avaliar o impacto do mesmo, a súa probabilidade de ocorrencia e o nivel de exposición ao risco. O impacto representa o efecto que a ocorrencia do risco tería sobre o desenvolvemento do proxecto e

termos de custo, esforzo ou duración total do mesmo. Defínese no Cadro 3.8 a valoración do impacto que se empregará na especificación de riscos.

Repercusión en Prazo / Esfuerzo / Custo	Impacto
$\geq 20\%$	Alto
Entre o 10 % e 20 %	Medio
$\leq 10\%$	Baixo

Cadro 3.8: Valorización do impacto sobre o prazo de entrada, esforzo e custo.

Por outra banda, a probabilidade dun risco representa a expectativa de ocorrencia real do risco no desenvolvemento do proxecto. Establécese no Cadro 3.9 como valoraremos este factor.

Ocorrencia do risco	Probabilidade
$\geq 80\%$ (case segura)	Alta
Entre o 30 % e 80 % (moi probable)	Media
$\leq 30\%$ (pouco probable)	Baixa

Cadro 3.9: Valorización da probabilidade da ocorrencia dun risco.

E finalmente unha vez achados a probabilidade de aparición e o nivel impacto que causaría o risco de ter sucedido, debemos calcular o nivel de exposición ao risco que é o produto destes dous factores. Esta medida permite extraer un conxuntos de riscos clave da lista de riscos que priorizaremos, pois é imposible abarcar e estar preparados para todos os riscos identificados inicialmente.

		Probabilidade		
		Alta	Media	Baixa
Impacto	Alto	Alto	Alto	Medio
	Medio	Alto	Medio	Baixo
	Baixo	Medio	Baixo	Baixo

Cadro 3.10: Nivel de exposición ao risco.

Inicialmente realizase unha identificación de riscos mediante as técnicas descritas máis enriba das cales se realizará unha análise para calcular as probabilidades de aparición e de impacto así como a súa exposición. Outorgaráselle prioridade a aqueles riscos coa maior exposición calculada. Serán estes os riscos obxecto da creación de accións preventivas e correctoras, pois é imposible abarcar unha numerosa lista de riscos e por outra banda poderíase estar desperdiciando recursos en riscos moi pouco probables ou con moi pouco impacto. Amósase nos Cadros

3.12 e 3.13 a listaxe inicial de riscos identificados tras a súa análise xa coa exposición estimada.

Da listaxe inicial de riscos identificados e analizados (Cadros 3.12 e 3.13) seleccionamos aqueles riscos que consideramos prioritarios (riscos cunha exposición estimada “Alta”) pois é imposible abarcar accións preventivas e correctivas de todos eles xa que consumiríamos moito tempo e moitos recursos.

Empregarase o Cadro 3.11 como modelo de especificación dos riscos identificados.

<b>Identificador</b>	Estará composto por “R-” seguido dun número que identificará a cada risco de maneira única.
<b>Descrición</b>	Breve descrición do risco.
<b>Probabilidade</b>	Baixa, media ou alta.
<b>Impacto</b>	Baixo, medio ou alto.
<b>Exposición</b>	Baixa, media ou alta.
<b>Acción preventiva</b>	Descrición da medida preventiva escollida para anticiparse ao risco e mitigar a súa aparición.
<b>Acción correctiva</b>	Descrición da medida correctora escollida para eliminar o risco ou mitigar os efectos adversos que lle poida causar ao proxecto unha vez aparecido o risco.

Cadro 3.11: Modelo para a especificación dos riscos.

### 3.5.2. Especificación de riscos

Nesta subsección presentarase as especificacións daqueles riscos seleccionados por ser prioritarios (maior impacto e maior probabilidade) seguindo o modelo anteriormente presentado.

Probabilidade	Impacto	Exposición	Descrición
Alta	Alto	<b>Alto</b>	Meticulosidade dos investigadores.
Media	Alto	<b>Alto</b>	Planificación optimista.
Alta	Alto	<b>Alto</b>	Os módulos propensos a ter erros necesitan máis traballo de comprobación, deseño, implementación e probas.
Alta	Alto	<b>Alto</b>	Desenvolvemento orientado á investigación.
Alta	Alto	<b>Alto</b>	Unha calidade non aceptable require dun traballo de comprobación, deseño, implementación e probas superior ao esperado.
Alta	Alto	<b>Alto</b>	O desenvolvemento de funcións software erróneas require volver deseñalas e a implementalas.
Alta	Alto	<b>Alto</b>	A falta da especialización necesaria por parte do desenvolvedor aumenta os defectos e a necesidade de repetir traballo.
Alta	Medio	<b>Alto</b>	O persoal necesita un tempo extra para afacerse a traballar en contornas novas.
Alta	Alto	<b>Alto</b>	A funcionalidade desexada non está implementada na linguaxe ou bibliotecas utilizadas: o persoal de desenvolvemento ten que utilizar outras bibliotecas, ou crealas el mesmo para conseguir a funcionalidade desexada.
Alta	Alto	<b>Alto</b>	Os resultados achados non alcanzan o rendemento agardado.
Media	Medio	<b>Medio</b>	Funcionalidades máis complexas consomen máis tempo que o planificado e estimado.
Baixa	Alto	<b>Medio</b>	Análise de riscos inadecuado.
Baixa	Alto	<b>Medio</b>	Pérdida de documentación e código fonte do proxecto debido a accidentes ou desastres naturais.
Alta	Baixo	<b>Medio</b>	O produto é máis grande que o estimado (en liñas de código).
Media	Medio	<b>Medio</b>	As áreas descoñecidas do produto levan máis tempo do empregado en deseño e implementación.
Media	Medio	<b>Medio</b>	Engádense requisitos extra (modificación do alcance do proxecto unha vez xa iniciado o proxecto).
Baixa	Alto	<b>Medio</b>	As partes do proxecto que non se especificaron claramente consomen máis tempo do agardado.

Cadro 3.12: Listaxe cos riscos identificados e analizados (Parte 1).

Probabilidade	Impacto	Exposición	Descrición
Baixa	Medio	<b>Baixo</b>	As compoñentes desenvolvidas por separado non se poden integrar de forma sinxela, tendo que volver deseñar e repetir algúns traballos
Baixa	Medio	<b>Baixo</b>	Os requisitos non se definiron correctamente e a súa redefinición aumenta o ámbito do proxecto
Baixa	Medio	<b>Baixo</b>	Pouca motivación dun membro do equipo de traballo
Baixa	Medio	<b>Baixo</b>	Un mal diseño implica volver a deseñar e implementar

Cadro 3.13: Listaxe cos riscos identificados e analizados (Parte 2).

<b>Identificador</b>	R-01
<b>Descrición</b>	Meticulosidade dos investigadores.
<b>Probabilidade</b>	Alta.
<b>Impacto</b>	Alto.
<b>Exposición</b>	Alto.
<b>Acción preventiva</b>	Establecer criterios de aceptación do produto a desenvolver para que un exceso de meticulosidade do proxecto de investigación provoque atrasos no proxecto ou un alcance superior ao establecido.
<b>Acción correctiva</b>	Verificar que o produto cumpre os requisitos esixidos e pasar a realizar a seguinte tarefa.

Cadro 3.14: Risco R-01

<b>Identificador</b>	R-02
<b>Descrición</b>	Planificación optimista.
<b>Probabilidade</b>	Media.
<b>Impacto</b>	Alto.
<b>Exposición</b>	Alto.
<b>Acción preventiva</b>	Controlar a planificación ao fin de cada actividade para así poder coñecer en todo momento o estado actual e poder realizar cambios ou adaptacións segundo sucedan producidos por situacións reais non estimadas.
<b>Acción correctiva</b>	Determinar o estado actual do cronograma do proxecto e intentar realizar unha versión do proxecto que inclúa os requisitos fundamentais deixando de lado aqueles que son optativos ou opcionais. Aumentarase a carga de traballo para cumprir os prazos se fora necesario.

Cadro 3.15: Risco R-02

<b>Identificador</b>	R-03
<b>Descrición</b>	Os módulos propensos a ter erros necesitan máis traballo de comprobación, deseño, implementación e probas
<b>Probabilidade</b>	Alta.
<b>Impacto</b>	Alto.
<b>Exposición</b>	Alto.
<b>Acción preventiva</b>	Analizar que módulos se estiman que son máis propensos a que se produzan problemas no seu desenvolvemento para así prestarlle máis atención da necesaria á hora de deseñalos e implementalos.
<b>Acción correctiva</b>	Determinar o estado actual do proxecto detectando que módulos son os problemáticos e poñer aos recursos humanos máis experimentados a intentar arranxar ese problema. Deste xeito mitigariamos a perda de tempo. Por outro lado aumentarase a carga de traballo para cumprir os prazos e compensar o tempo perdido.

Cadro 3.16: Risco R-03

<b>Identificador</b>	R-04
<b>Descrición</b>	Desenvolvemento orientado á investigación.
<b>Probabilidade</b>	Alta.
<b>Impacto</b>	Alto.
<b>Exposición</b>	Alto.
<b>Acción preventiva</b>	Estudar inicialmente antecedentes de técnicas similares e/ou as posibilidades de atopar resultados no eido que se quere investigar antes de poñerse a desenvolver o proxecto a total disposición.
<b>Acción correctiva</b>	Analizar a posibilidade de atopar resultados no eido que se está a investigar antes de proseguir co desenvolvemento e revisar a planificación.

Cadro 3.17: Risco R-04

<b>Identificador</b>	R-05
<b>Descrición</b>	Unha calidade non aceptable require dun traballo de comprobación, deseño, implementación e probas superior ao esperado.
<b>Probabilidade</b>	Alta.
<b>Impacto</b>	Alto.
<b>Exposición</b>	Alto.
<b>Acción preventiva</b>	Realizar unha boa formación na contorna a investigar antes da realización de cada iteración e estimar a calidade dos posibles resultados a achar antes de pñerse a deseñar, implementar, etc. Definir unha serie de regras e procedementos que permitan ao proxecto cumprir cos requisitos propostos coa calidade estimada.
<b>Acción correctiva</b>	Achar que partes ou módulos do proxecto están facendo que este teña unha calidade empobrecida para así analízalos e corríxilos. Aumentarase a carga de traballo para cumprir os prazos, se fora necesario, e así compensar o tempo perdido.

Cadro 3.18: Risco R-05

<b>Identificador</b>	R-06
<b>Descrición</b>	O desenvolvemento de funcións software erróneas require volver deseñalas e a implementalas.
<b>Probabilidade</b>	Alta.
<b>Impacto</b>	Alto.
<b>Exposición</b>	Alto.
<b>Acción preventiva</b>	Realizar unha análise e deseño máis exhaustivo para que non caiba lugar a erro, e se este se produce que se concentre simplemente na implementación para así non ter que volver a fases anteriores.
<b>Acción correctiva</b>	Determinar o estado da planificación temporal e modificar esta para así poder corraxir, aproveitando a maior parte do traballo feito, as funcións erróneas. Aumentarase a carga de traballo para cumprir os prazos.

Cadro 3.19: Risco R-06

<b>Identificador</b>	R-07
<b>Descrición</b>	A falta da especialización necesaria por parte do desenvolvedor aumenta os defectos e a necesidade de repetir traballo.
<b>Probabilidade</b>	Alta.
<b>Impacto</b>	Alto.
<b>Exposición</b>	Alto.
<b>Acción preventiva</b>	Realizar unha boa formación na contorna a investigar antes de comezar co deseño e desenvolvemento do proxecto.
<b>Acción correctiva</b>	Determinar o estado da planificación temporal para realizar formación no eido de investigación que permita avanzar a maiores pasos unha vez solventada a falta de especialización do desenvolvedor. Aumentarase a carga de traballo para cumprir os prazos.

Cadro 3.20: Risco R-07

<b>Identificador</b>	R-08
<b>Descrición</b>	O persoal necesita un tempo extra para afacerse a traballar en contornas novas.
<b>Probabilidade</b>	Alta.
<b>Impacto</b>	Medio.
<b>Exposición</b>	Alto.
<b>Acción preventiva</b>	Realizar unha planificación temporal acorde aos coñecementos do equipo de traballo, non pasando en alto posibles cursos de formación ou tempo de adaptación ao eido de traballo.
<b>Acción correctiva</b>	Determinar o estado da planificación temporal para reservar unha pequena cantidade de tempo estimado para que o persoal se afaga á contorna de traballo.

Cadro 3.21: Risco R-08

<b>Identificador</b>	R-09
<b>Descrición</b>	A funcionalidade desexada non está implementada na linguaxe ou bibliotecas utilizadas: o persoal de desenvolvemento ten que utilizar outras bibliotecas, ou crealas el mesmo para conseguir a funcionalidade desexada.
<b>Probabilidade</b>	Alta.
<b>Impacto</b>	Alto.
<b>Exposición</b>	Alto.
<b>Acción preventiva</b>	Analizar e deseñar a funcionalidade desexada para así poder implementala con éxito.
<b>Acción correctiva</b>	En última instancia, buscar librarías que implementen a función ou buscar implementacións noutras linguaxes para así poder entender mellor a funcionalidade que debe realizar a función a desenvolver e traducila a linguaxe de programación do proxecto.

Cadro 3.22: Risco R-09

<b>Identificador</b>	R-10
<b>Descrición</b>	Os resultados achados non alcanzan o rendemento agardado.
<b>Probabilidade</b>	Alta.
<b>Impacto</b>	Alto.
<b>Exposición</b>	Alto.
<b>Acción preventiva</b>	Analizar, estudar e investigar a viabilidade do proxecto ou dos módulos do proxecto que teñan menos probabilidade de obter bos resultados antes de comezar coa súa fase de desenvolvemento.
<b>Acción correctiva</b>	Obter cal é a razón porque na práctica non se demostra o achado teoricamente que se podería conseguir e intentar buscarlle e levar a cabo un proceso para solucionalo.

Cadro 3.23: Risco R-10

# Capítulo 4

## Análise

Neste capítulo presentarase a definición dos requisitos que serán soportados polo sistema<sup>1</sup> resultante deste proxecto. Estes serviran como base para o seu desenvolvemento pois definen as necesidades do cliente e serven para asegurarnos que se cumpre o alcance do mesmo, podendo revisar o cumprimento das diferentes funcionalidades. A especificación realizarase seguindo as recomendacións do estándar IEEE 830-1998 [22] e as recomendacións de Sommerville [23] para así obter unha especificación de requisitos completa, consistente, correcta e non ambigua.

A continuación detallaranse as distintas iteracións que serán realizadas no proxecto, como xa se veu na planificación, relacionándoas cos requisitos que deberán cumprir en cada unha delas.

Finalmente amosarase o diagrama de casos de uso do sistema, especificaranse estes casos de uso e os actores participantes e presentarase a matriz de trazabilidade.

### 4.1. Análise de Requisitos

Os requisitos para un sistema son a descrición dos servizos proporcionados polo sistema e as súas restricións operativas. Estes requisitos reflicten as necesidades dos clientes dun sistema que os axude a resolver algún problema, en outras palabras, describen de forma completa o comportamento do software a desenvolver.

Para recopilar os requisitos do sistema empregáronse as seguintes técnicas [24]:

---

<sup>1</sup>Referímonos ao sistema do proxecto como ao conxunto formado pola implementación dunha ferramenta de rexistrado, que será a que inclúa todos algoritmos e técnicas desenvolvidas, e un módulo para a aplicación *HypeRvieW* que só implementa aquelas mellores solucións.

- **Entrevistas:** Fixéronse entrevistas cos clientes do proxecto co fin de recopilar aquelas necesidades que debe cubrir o sistema mantendo unha conversación directa.
- **Estudo de documentación:** Debido ao ser un entorno e temática que o autor do proxecto non domina, tívose que comezar con unha boa formación e estudo de documentos que tratan da materia. Os clientes contaban con numerosa documentación por onde comezar a mergullarse no contido a tratar.
- **Tormenta de ideas:** Consiste en reunións onde participa o analista e os clientes, nas cales se suxiren toda clase de ideas sen avaliar a súa validez. Nunha segunda fase realizase unha criba e unha análise máis detallada de cada idea. Realizáronse varias destas reunións como medio para identificar un primeiro conxunto de requisitos, sobre todo naqueles casos máis dúbidosos.

#### 4.1.1. Glosario

Especificado no final desta memoria (Capítulo 9) por abranguer definicións e acrónimos non só empregada nesta Especificación de Requisitos se non tamén en demais capítulos.

#### 4.1.2. Participantes no proxecto

Os participantes do proxecto son os descritos no Cadro 4.1.

Participante	Función a desenvolver	Organización
Álvaro Ordóñez	Desenvolvedor do proxecto	Estudante da Universidade de Santiago de Compostela (USC)
Francisco Argüello	Director do proxecto/Cliente	Departamento de Electrónica e Computación da USC
Dora Blanco	Directora do proxecto/Cliente	Centro Singular de Investigación en Tecnoloxías da Información (CiTIUS)

Cadro 4.1: Participantes do proxecto.

#### 4.1.3. Catálogo de Requisitos

Para unha maior organización e clarificación os requisitos adóitanse clasificar, existindo diversas propostas para isto e podendo variar adaptándose ao proxec-

to. Neste proxecto organizaremos os requisitos seguindo a seguinte clasificación baseada na de Sommerville [23]:

- **Requisitos funcionais:** Son declaracións dos servizos que proverá o sistema, da maneira no que este reaccionará a entradas particulares e de como se comportará en situacións particulares. Noutras palabras, expresan as funcionalidades que deberá ter o produto final.
- **Requisitos non funcionais:** Son restricións das funcións ou servizos ofrecidos polo sistema. Inclúen requisitos de diversos tipos como pode ser de rendemento, de usabilidade, de eficiencia, de seguridade de estándares...
  - **Requisitos de produto:** Especifica comportamentos do produto tales como a eficiencia, a rapidez de execución, consumo de memoria requirido entre outros; a usabilidade; a fiabilidade e a portabilidade.
  - **Requisitos de organización:** Son requisitos derivados de políticas e procedementos existentes na organización do desenvolvedor e do cliente. Algúns exemplos son que estándares deben empregarse; que requisitos de implementación existen, como as linguaxes de programación a utilizar ou os métodos de deseño, e os requisitos de entrega que especifican cando se entregará o produto e a documentación.
  - **Requisitos externos:** Inclúe todos os requisitos que derivan de factores externos do produto e do seu proceso de desenvolvemento. Poden ser requisitos de interoperabilidade, requisitos legislativos e requisitos éticos.
- **Requisitos do dominio:** Son requisitos que proveñen do dominio de aplicación do sistema máis que das necesidades específicas do usuario. Adoitan incluír terminoloxía especializada do dominio. Poden ser requisitos funcionais ou non funcionais, restrinxir aos existentes ou establecer como se deben executar os cálculos particulares.

Para facilitar a identificación dos requisitos cada un terá un identificador único que comezará con unha das nomenclaturas amosadas no Cadro 4.2 a fin de identificar a que categoría pertencen.

Nomenclatura	Tipo de requisito
<b>RF</b>	Requisito funcional
<b>RNP</b>	Requisito non funcional de produto
<b>RNO</b>	Requisito non funcional de organización
<b>RNE</b>	Requisito non funcional externo
<b>RD</b>	Requisito do dominio

Cadro 4.2: Nomenclaturas de requisitos

**Requisitos funcionais**

- RF-01** Cargar ficheiro de datos en formato RAW.
- RF-02** Calcular Componentes Principais (PCA) dunha imaxe de entrada.
- RF-03** Calcular gradiente RCMG dunha imaxe de entrada.
- RF-04** Calcular gradiente vectorial dunha imaxe de entrada.
- RF-05** Calcular gradiente RCMG das bandas PCA dunha imaxe de entrada.
- RF-06** Calcular gradiente vectorial das bandas PCA dunha imaxe de entrada.
- RF-07** Aplicar o algoritmo a unha ou varias (de forma individual) bandas PCA.
- RF-08** Calcular a media de unha ou varias bandas consecutivas PCA.
- RF-09** Rexistrar unha imaxe a partir doutra tamén proporcionada.
- RF-10** Rexistrar unha imaxe a partir doutra auto-xerada.
- RF-11** Rotar, escalar e desprazar unha imaxe dunha soa banda.
- RF-12** Rotar, escalar e desprazar unha imaxe hiperespectral.
- RF-13** Amosar o ángulo de rotación, o factor de escala e os valores de desprazamento obtidos do rexistrado.
- RF-14** Gardar imaxe resultante do proceso de rexistrado en formato RAW.
- RF-15** Gardar imaxe resultante do proceso de rexistrado en formato PGM.
- RF-16** Interface por liña de comandos.

***Requisitos funcionais específicos da interface gráfica***

- RF-17** Crear módulo para *HypeRvieW* cos mellores algoritmos e técnicas de redución de dimensionalidade desenvolvidos (interface gráfica).

**RF-18** Permitir especificar parámetros numéricos do proceso de rexistrado.

**RF-19** Permitir elixir algoritmo.

**RF-20** Permitir elixir técnica de redución de dimensionalidade.

**RF-21** Amosar imaxe hiperespectral de entrada.

**RF-22** Amosar imaxe resultante do proceso de rexistrado.

**RF-23** Ver e gardar a saída textual do proceso de rexistrado.

### **Requisitos non funcionais de produto**

**RNP-01** O algoritmo deberá detectar escalados de polo menos ata 3x con calquera rotación e desprazamento.

**RNP-02** Concluir que algoritmo é o máis eficiente e sobre que técnica de redución de dimensionalidade.

**RNP-03** A interface gráfica deberá contar cunha alta usabilidade, eficiencia, eficacia e fiabilidade.

**RNP-04** A interface gráfica do módulo de rexistrado debera incluír unha axuda.

### **Requisitos non funcionais de organización**

**RNO-01** Desenvolvemento dos algoritmos e técnicas mediante linguaxe de programación C.

**RNO-02** O sistema desenvolverase para sistemas operativos Linux.

### **Requisitos non funcionais externos**

**RNE-01** Desenvolvemento do módulo para interface gráfica mediante GTK+.

### Requisitos do dominio

**RD-01** O algoritmo deberá rexistrar imaxes hiperespectrais.

**RD-02** O algoritmo deberá estar baseado na Transformada Rápida de Fourier.

#### 4.1.4. Especificación de Requisitos

Nesta sección procédese a detallar os requisitos enumerados no apartado 4.1.3. Detallaranse seguindo o esquema amosado no Cadro 4.1.4.

<b>Identificador:</b>	
<b>Título:</b>	
<b>Descrición:</b>	
<b>Importancia:</b>	Esencial, condicional, opcional.
<b>Prioridade:</b>	Alta, media e baixa.
<b>Criterio de validación:</b>	

Cadro 4.3: Modelo de especificación de requisitos

A importancia coa cal se catalogará un requisito explícase no Cadro 4.4.

<b>Importancia</b>	<b>Descrición</b>
<b>Esencial</b>	Implica que o software non será aceptable a menos que estes requisitos se proporcionen dunha maneira convencida. Son requisitos de grande importancia para conseguir o obxectivo principal do proxecto.
<b>Condicional</b>	Son requisitos que reforzarían a calidade do produto obtido, pero non o faría inaceptable se están ausentes, é dicir, pódese conseguir o obxectivo principal do proxecto prescindindo deles.
<b>Optativo</b>	Son requisitos que tamén melloran a calidade do proxecto pero nun grao menor aos requisitos condicionais. Só se levarán a cabo se se dispón de tempo suficiente.

Cadro 4.4: Tipos de importancia de requisitos

### Requisitos funcionais

Detállanse os requisitos funcionais do sistema entre o Cadro 4.5 e o Cadro 4.27.

<b>Identificador:</b>	RF-01
<b>Título:</b>	Cargar ficheiro de datos en formato RAW.
<b>Descrición:</b>	O usuario poderá cargar ficheiros de datos dunha imaxe hiperespectral como entrada para o algoritmo en formato RAW.
<b>Importancia:</b>	Esencial.
<b>Prioridade:</b>	Alta.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se a implementación é capaz de abrir e interpretar os datos contidos no ficheiro de datos da imaxe hiperespectral en formato RAW.

Cadro 4.5: Requisito RF-01: Cargar ficheiro de datos en formato RAW.

<b>Identificador:</b>	RF-02
<b>Título:</b>	Calcular Componentes Principais (PCA) dunha imaxe de entrada.
<b>Descrición:</b>	A ferramenta de rexistrado deberá ser capaz de calcular as componentes principais (PCA) dunha imaxe hiperespectral cargada previamente na aplicación. Isto ten como fin ser unha modalidade de técnica de redución de dimensionalidade que o usuario pode escoller.
<b>Importancia:</b>	Esencial.
<b>Prioridade:</b>	Alta.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se a implementación é capaz de calcular as bandas PCAs a partir dunha imaxe hiperespectral previamente aberta. Para isto gardárase esa banda nun formato facilmente visible (PGM, por exemplo) e visualízase se concorda con resultado proporcionado por dita técnica, xa que empregaremos imaxes de pequeno tamaño das cales coñecemos o resultado previamente. O uso de imaxes de pequeno tamaño son unicamente para a comprobación de que a implementación está correcta.

Cadro 4.6: Requisito RF-02: Calcular Componentes Principais (PCA) dunha imaxe de entrada.

<b>Identificador:</b>	RF-03
<b>Título:</b>	Calcular gradiente RCMG dunha imaxe de entrada.
<b>Descrición:</b>	A ferramenta de rexistrado deberá ser capaz de calcular o gradiente RCMG dunha imaxe hiperspectral cargada previamente na aplicación. Isto ten como fin ser unha modalidade de técnica de redución de dimensionalidade que o usuario pode escoller.
<b>Importancia:</b>	Esencial.
<b>Prioridade:</b>	Media.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se a implementación é capaz de calcular e xerar unha imaxe dunha única banda que corresponda co gradiente RCMG. Para isto gardárase esa banda nun formato facilmente visible (PGM, por exemplo) e visualizárase se concorda con resultado proporcionado por dita técnica, xa que empregaremos imaxes de pequeno tamaño das cales coñecemos o resultado previamente. O uso de imaxes de pequeno tamaño son unicamente para a comprobación de que a implementación está correcta.

Cadro 4.7: Requisito RF-03: Calcular gradiente RCMG dunha imaxe de entrada.

<b>Identificador:</b>	RF-04
<b>Título:</b>	Calcular gradiente vectorial dunha imaxes de entrada.
<b>Descrición:</b>	A ferramenta de rexistrado deberá ser capaz de calcular o gradiente vectorial dunha imaxe hiperespectral cargada previamente na aplicación. Isto ten como fin ser unha modalidade de técnica de redución de dimensionalidade que o usuario pode escoller.
<b>Importancia:</b>	Esencial.
<b>Prioridade:</b>	Media.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se a implementación é capaz de calcular e xerar unha imaxe dunha única banda que corresponda co gradiente vectorial. Para isto gardárase esa banda nun formato facilmente visible (PGM, por exemplo) e visualízase se concorda con resultado proporcionado por dita técnica, xa que empregaremos imaxes de pequeno tamaño das cales coñecemos o resultado previamente. O uso de imaxes de pequeno tamaño son unicamente para a comprobación de que a implementación está correcta.

Cadro 4.8: Requisito RF-04: Calcular gradiente vectorial dunha imaxe de entrada.

<b>Identificador:</b>	RF-05
<b>Título:</b>	Calcular gradiente RCMG das bandas PCA dunha imaxe de entrada.
<b>Descrición:</b>	A ferramenta de rexistrado deberá ser capaz de permitirle ao usuario calcular o gradiente RCMG das bandas PCAs obtidas a partir dunha imaxe hiperespectral cargada previamente na aplicación. Isto ten como fin ser unha modalidade de técnica de redución de dimensionalidade que o usuario pode escoller.
<b>Importancia:</b>	Condicional.
<b>Prioridade:</b>	Media.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerarase cumprido se a implementación é capaz de primeiramente de obter as bandas PCA a partir dunha imaxe hiperespectral, e a continuación se a partir deses datos é capaz de calcularlle o seu gradiente RCMG. Para isto gardarase esa banda nun formato facilmente visible (PGM, por exemplo) e visualizárase se concorda con resultado proporcionado por dita técnica, xa que empregaremos imaxes de pequeno tamaño das cales coñecemos o resultado previamente. O uso de imaxes de pequeno tamaño son unicamente para a comprobación de que a implementación está correcta.

Cadro 4.9: Requisito RF-05: Calcular gradiente RCMG das bandas PCA dunha imaxe de entrada.

<b>Identificador:</b>	RF-06
<b>Título:</b>	Calcular gradiente vectorial das bandas PCA dunha imaxe de entrada.
<b>Descrición:</b>	A ferramenta de rexistrado deberá ser capaz de permitir-lle ao usuario calcular o gradiente vectorial das bandas PCAs obtidas a partir dunha imaxe hiperespectral cargada previamente na aplicación. Isto ten como fin ser unha modalidade de técnica de redución de dimensionalidade que o usuario pode escoller.
<b>Importancia:</b>	Condional.
<b>Prioridade:</b>	Media.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se a implementación é capaz de primeiramente de obter as bandas PCA a partir dunha imaxe hiperespectral, e a continuación se a partir deses datos é capaz de calcularlle o seu gradiente vectorial. Para isto gardarase esa banda nun formato facilmente visible (PGM, por exemplo) e visualízase se concorda con resultado proporcionado por dita técnica, xa que empregaremos imaxes das cales coñecemos o resultado previamente. O uso de imaxes de pequeno tamaño son unicamente para a comprobación de que a implementación está correcta.

Cadro 4.10: Requisito RF-06: Calcular gradiente vectorial das bandas PCA dunha imaxe de entrada.

<b>Identificador:</b>	RF-07
<b>Título:</b>	Aplicar o algoritmo a unha ou varias (de forma individual) bandas PCA.
<b>Descrición:</b>	A ferramenta de rexistrado deberá ser capaz de permitirle ao usuario aplicar o algoritmo desenvolvido a un número de bandas PCA, de forma individual, especificado por el mesmo como un dos datos de entrada. Deste xeito permitimos unha maior usabilidade e comodidade, pois pode que ao usuario só lle interese por exemplo rexistrar a primeira banda ou as tres primeiras.
<b>Importancia:</b>	Condicional.
<b>Prioridade:</b>	Media.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se a ferramenta de rexistrado é capaz de rexistrar iterativamente un número de bandas PCA especificadas polo usuario, amosándonos os resultados de tal acto por pantalla e especificando a que banda corresponde cada un deles.

Cadro 4.11: Requisito RF-07: Aplicar o algoritmo a unha ou varias (de forma individual) bandas PCA.

<b>Identificador:</b>	RF-08
<b>Título:</b>	Calcular a media de unha ou varias bandas consecutivas PCA.
<b>Descrición:</b>	A ferramenta de rexistrado deberá ser capaz de calcular a media dun número de bandas PCA consecutivas especificadas polo usuario. Bandas obtidas despois do cálculo de bandas PCA a partir dunha imaxe hiperespectral. Isto ten como fin ser outra modalidade de técnica de redución de dimensionalidade que o usuario pode escoller.
<b>Importancia:</b>	Condicional.
<b>Prioridade:</b>	Media.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerarase cumprido se o resultado obtido concorda co resultado agardado, pois empregaranse imaxes de pequeno tamaño das cales coñecemos o resultado anticipadamente. O uso de imaxes de pequeno tamaño son unicamente para a comprobación de que a implementación está correcta.

Cadro 4.12: Requisito RF-08: Calcular a media de unha ou varias bandas consecutivas PCA.

<b>Identificador:</b>	RF-09
<b>Título:</b>	Rexistrar unha imaxe a partir doutra tamén proporcionada.
<b>Descrición:</b>	O usuario deberá poder especificar dúas imaxes de entrada, a imaxe de referencia e a imaxe a rexistrar, sobre as cales a ferramenta de rexistrado aplicará o algoritmo de rexistrado.
<b>Importancia:</b>	Esencial.
<b>Prioridade:</b>	Alta.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerarase cumprido se a ferramenta de rexistrado é capaz de rexistrar as imaxes, das cales coñecemos o ángulo de rotación e escala que os diferenzan, amosándonos o resultado esperado de tal acto por pantalla.

Cadro 4.13: Requisito RF-09: Rexistrar unha imaxe a partir doutra tamén proporcionada.

<b>Identificador:</b>	RF-10
<b>Título:</b>	Rexistrar unha imaxe a partir doutra auto-xerada.
<b>Descrición:</b>	O usuario deberá poder especificar unha imaxe de entrada, imaxe de referencia, e un ángulo, un factor de escala e un desprazamento os cales se aplicaran a dita imaxe de referencia obtendo a imaxe a rexistrar. Sobre estas dúas imaxes a ferramenta aplicará o algoritmo de rexistrado.
<b>Importancia:</b>	Esencial.
<b>Prioridade:</b>	Alta.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se a ferramenta de rexistrado é capaz de obter os valores do ángulo de rotación, do factor de escala e de desprazamento proporcionados polo usuario e nos amosa o resultado por pantalla.

Cadro 4.14: Requisito RF-10: Rexistrar unha imaxe a partir doutra auto-xerada.

<b>Identificador:</b>	RF-11
<b>Título:</b>	Rotar, escalar e desprazar unha imaxe dunha soa banda.
<b>Descrición:</b>	A ferramenta de rexistrado deberá poder rotar, escalar e desprazar imaxes dunha soa banda. Isto empregárase para diferentes fins como por exemplo xerar a imaxe dunha soa banda resultante do algoritmo de rexistrado.
<b>Importancia:</b>	Esencial.
<b>Prioridade:</b>	Alta.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se a ferramenta de rexistrado é capaz xerar unha imaxe rotada con calquera ángulo e/ou escalada con calquera factor que lle indique o usuario respectando intervalos prefixados. Para facilitar a visualización deste cumprimento, esta imaxe pode ser gravada nun formato visualizable como pode ser PGM.

Cadro 4.15: Requisito RF-11: Rotar, escalar e desprazar unha imaxe dunha soa banda.

<b>Identificador:</b>	RF-12
<b>Título:</b>	Rotar, escalar e desprazar unha imaxe hiperespectral.
<b>Descrición:</b>	A ferramenta de rexistrado deberá poder rotar, escalar e desprazar imaxes hiperespectrais. Isto empregarase para diferentes fins, xerar a imaxe rexistrada resultante do algoritmo, calcular imaxe de entrada a partir de outra...
<b>Importancia:</b>	Esencial.
<b>Prioridade:</b>	Alta.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se a ferramenta de rexistrado é capaz xerar unha imaxe rotada con calquera ángulo e/ou escalada con calquera factor que lle indique o usuario. Esta imaxe será gravada nun formato visualizable como pode ser PGM ademais de en formato RAW se é necesario.

Cadro 4.16: Requisito RF-12: Rotar, escalar e desprazar unha imaxe hiperespectral.

<b>Identificador:</b>	RF-13
<b>Título:</b>	Amosar o ángulo de rotación, o factor de escala e os valores de desprazamento obtidos do rexistrado.
<b>Descrición:</b>	A ferramenta de rexistrado deberá amosar os resultados por pantalla do algoritmo de rexistrado, especificando claramente cal é o ángulo de rotación, cal o desprazamento e cal o factor de escala.
<b>Importancia:</b>	Esencial.
<b>Prioridade:</b>	Alta.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se a ferramenta de rexistrado imprime por pantalla os resultados despois da execución do algoritmo de rexistrado.

Cadro 4.17: Requisito RF-13: Amosar o ángulo de rotación, o factor de escala e os valores de desprazamento obtidos do rexistrado.

<b>Identificador:</b>	RF-14
<b>Título:</b>	Gardar imaxe resultante do proceso de rexistrado en formato RAW.
<b>Descrición:</b>	A ferramenta de rexistrado deberá poder gardar a imaxe resultante do proceso de rexistrado en ficheiro de datos en formato RAW.
<b>Importancia:</b>	Condicional.
<b>Prioridade:</b>	Media.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerarase cumprido se a ferramenta de rexistrado permite gardar a imaxe resultante do proceso de rexistrado nun ficheiro en formato RAW.

Cadro 4.18: Requisito RF-14: Gardar imaxe resultante do proceso de rexistrado en formato RAW.

<b>Identificador:</b>	RF-15
<b>Título:</b>	Gardar imaxe resultante do proceso de rexistrado en formato PGM.
<b>Descrición:</b>	A ferramenta de rexistrado deberá poder gardar a imaxe resultante do proceso de rexistrado en ficheiro de datos en formato PGM dunha soa banda.
<b>Importancia:</b>	Condicional.
<b>Prioridade:</b>	Media.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerarase cumprido se a ferramenta de rexistrado permite gardar a imaxe resultante do proceso de rexistrado nun ficheiro en formato PGM.

Cadro 4.19: Requisito RF-15: Gardar imaxe resultante do proceso de rexistrado en formato PGM.

<b>Identificador:</b>	RF-16
<b>Título:</b>	Interface por liña de comandos.
<b>Descrición:</b>	A ferramenta de rexistrado deberá permitir executar o algoritmo dende liñas de comando permitindo nese mesmo momento pasarlle os parámetros necesarios para a súa configuración.
<b>Importancia:</b>	Condicional.
<b>Prioridade:</b>	Media.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se a ferramenta de rexistrado permite executar e configurar o algoritmo dende liña de comandos.

Cadro 4.20: Requisito RF-16: Interface por liña de comandos.

<b>Identificador:</b>	RF-17
<b>Título:</b>	Crear módulo para <i>HypeRvieW</i> cos mellores algoritmos e técnicas de redución de dimensionalidade desenvolvidos (interface gráfica).
<b>Descrición:</b>	Desenvolverase un módulo para a aplicación <i>HypeRvieW</i> , de procesado e clasificación de imaxes hiperespectrais, que inclúan os mellores algoritmos e técnicas de redución de dimensionalidade e extracción de características realizados neste traballo. O obxectivo deste requisito é dotar ás técnicas aquí desenvolvidas de usabilidade, eficacia e eficiencia de cara o uso por parte do usuario final.
<b>Importancia:</b>	Optativa.
<b>Prioridade:</b>	Baixa.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se se desenvolve un módulo para a ferramenta <i>HypeRvieW</i> e aparece na listaxe de módulos do ámbito de preprocesado como tal.

Cadro 4.21: Requisito RF-17: Crear módulo para *HypeRvieW* cos mellores algoritmos e técnicas de redución de dimensionalidade desenvolvidos (interface gráfica).

<b>Identificador:</b>	RF-18
<b>Título:</b>	Permitir especificar parámetros numéricos do proceso de rexistrado.
<b>Descrición:</b>	Dentro da interface gráfica desenvolvida no módulo para <i>HypeRvieW</i> o usuario deberá poder especificar por teclado os valores numéricos seguintes: factor de escala, desprazamentos, ángulo de rotación e ruído.
<b>Importancia:</b>	Optativa.
<b>Prioridade:</b>	Baixa.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerarase cumprido se existe na interface gráfica cadros de texto onde poder especificar os valores de factor de escala, desprazamentos, ángulo de rotación e ruído dentro duns valores predefinidos.

Cadro 4.22: Requisito RF-18: Permitir especificar parámetros numéricos do proceso de rexistrado.

<b>Identificador:</b>	RF-19
<b>Título:</b>	Permitir elixir algoritmo.
<b>Descrición:</b>	Dentro da interface gráfica desenvolvida no módulo para <i>HypeRvieW</i> o usuario deberá poder elixir mediante un elemento gráfico seleccionable cal dos algoritmos integrados no módulo quere empregar.
<b>Importancia:</b>	Optativa.
<b>Prioridade:</b>	Baixa.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerarase cumprido se existe na interface gráfica un elemento gráfico que liste os algoritmos integrados no módulo e que permita seleccionar un.

Cadro 4.23: Requisito RF-19: Permitir elixir algoritmo.

<b>Identificador:</b>	RF-20
<b>Título:</b>	Permitir elixir técnica de reducción de dimensionalidade.
<b>Descrición:</b>	Dentro da interface gráfica desenvolvida no módulo para <i>HypeRvieW</i> o usuario deberá poder elixir mediante un elemento gráfico seleccionable cal das técnicas de reducción de dimensionalidade e extracción de características integradas no módulo quere empregar.
<b>Importancia:</b>	Optativa.
<b>Prioridade:</b>	Baixa.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se existe na interface gráfica un elemento gráfico que liste as técnicas de reducción de dimensionalidade e extracción de características integradas no módulo e que permita seleccionar unha delas.

Cadro 4.24: Requisito RF-20: Permitir elixir técnica de reducción de dimensionalidade.

<b>Identificador:</b>	RF-21
<b>Título:</b>	Amosar imaxe hiperespectral de entrada.
<b>Descrición:</b>	A aplicación amosará unha das bandas da imaxes hiperespectral de entrada nunha ventana.
<b>Importancia:</b>	Optativa.
<b>Prioridade:</b>	Baixa.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se unha vez aberto o ficheiro de datos da imaxe hiperespectral se amosa a banda seleccionada de dita imaxe.

Cadro 4.25: Requisito RF-21: Amosar imaxe hiperespectral de entrada.

<b>Identificador:</b>	RF-22
<b>Título:</b>	Amosar imaxe resultante do proceso de rexistrado.
<b>Descrición:</b>	A aplicación amosará a primeira banda da imaxe hiperespectral a rexistrar aliñada segundo os resultados achados polo algoritmo nunha nova ventana. Noutras palabras, o usuario visualizará o resultado gráfico aplicado á primeira banda da imaxe que se quere rexistrar.
<b>Importancia:</b>	Optativa.
<b>Prioridade:</b>	Baixa.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se unha vez concluído o proceso de rexistrado se abre unha nova ventana amosando o resultado gráfico de tal proceso.

Cadro 4.26: Requisito RF-22: Amosar imaxe resultante do proceso de rexistrado.

<b>Identificador:</b>	RF-23
<b>Título:</b>	Ver e gardar a saída textual do proceso de rexistrado.
<b>Descrición:</b>	O usuario poderá visualizar, a medida que se vai executando o proceso de rexistrado, e gardar, unha vez concluído o proceso, a saída en modo texto que vaia xerando o módulo de rexistrado.
<b>Importancia:</b>	Optativa.
<b>Prioridade:</b>	Baixa.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se a aplicación amosa a saída que vaia xerando o proceso de rexistrado a medida que se vai executando e se cando este proceso remate permite gardala nun ficheiro.

Cadro 4.27: Requisito RF-23: Ver e gardar a saída textual do proceso de rexistrado.

### Requisitos non funcionais de produto

Detállanse os requisitos non funcionais de produto do sistema entre o Cadro 4.28 e o Cadro 4.31.

<b>Identificador:</b>	RNP-01
<b>Título:</b>	O algoritmo deberá detectar escalados de polo menos ata 3x con calquera rotación e desprazamento.
<b>Descrición:</b>	O algoritmo desenvolvido deberá ser capaz de rexistrar imaxes que disten unha da outra dun factor de ata polo menos 3x en escalado con calquera ángulo de rotación e con calquera valores de desprazamento.
<b>Importancia:</b>	Crítica.
<b>Prioridade:</b>	Alta.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se tras a realización de diversas probas con imaxes cunha resolución aceptable con escalados de 3x e con diferentes ángulos e valores de desprazamento, o algoritmo é capaz de achar todos os ángulos de rotación e valores de desprazamento perfectamente.

Cadro 4.28: Requisito RNP-01: O algoritmo deberá detectar escalados de polo menos ata 3x con calquera rotación e desprazamento.

<b>Identificador:</b>	RNP-02
<b>Título:</b>	Concluír que algoritmo é o máis eficiente e sobre que técnica de redución de dimensionalidade.
<b>Descrición:</b>	Deberanse realizar probas de todos as variantes de algoritmo desenvolvidas no proxecto e aplicar estes algoritmos ás diferentes técnicas de redución de dimensionalidade e extracción de características realizadas para deste xeito poder concluír que solución é a que acha mellores resultados.
<b>Importancia:</b>	Crítica.
<b>Prioridade:</b>	Alta.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se se realizan probas con todos os algoritmos desenvolvidos aplicándolle previamente as técnicas de redución de dimensionalidade e extracción de características realizadas as imaxes a rexistrar, e se conclúe na memoria cal é a mellor ou mellores solucións.

Cadro 4.29: Requisito RNP-02: Concluír que algoritmo é o máis eficiente e sobre que técnica de redución de dimensionalidade.

<b>Identificador:</b>	RNP-03
<b>Título:</b>	A interface gráfica deberá contar cunha alta usabilidade, eficiencia, eficacia e fiabilidade.
<b>Descrición:</b>	Deberase deseñar unha interface gráfica para a especificación dos parámetros de entrada dos algoritmos facilmente usable e que permita aumentar a comodidade e satisfacción dos usuarios así como o entendemento e a eficiencia. Os usuarios deberán poder realizar o rexistrado de imaxes hiperespectrais dun xeito máis sinxelo, rápido e amigable.
<b>Importancia:</b>	Optativa.
<b>Prioridade:</b>	Baixa.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se posibles usuarios finais conseguen realizar o proceso de rexistrado sen axuda externa máis que a proporcionada pola ferramenta.

Cadro 4.30: Requisito RNP-03: A interface gráfica deberá contar cunha alta usabilidade, eficiencia, eficacia e fiabilidade.

<b>Identificador:</b>	RNP-04
<b>Título:</b>	A interface gráfica do módulo de rexistrado debera incluír unha axuda.
<b>Descrición:</b>	A interface gráfica deseñada para a especificación dos parámetros de entrada do modulo de rexistrado deberá contar cunha axuda onde se explique que se debe especificar en cada parámetro solicitado e que rango de valores son válidos.
<b>Importancia:</b>	Optativa.
<b>Prioridade:</b>	Baixa.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se a interface gráfica do modulo de rexistrado dispón dunha opción que amosa unha axuda de uso ao usuario.

Cadro 4.31: Requisito RNP-04: A interface gráfica do módulo de rexistrado debera incluír unha axuda.

### Requisitos non funcionais de organización

Detállanse os requisitos non funcionais de organización do sistema entre o Cadro 4.32 e o Cadro 4.33.

<b>Identificador:</b>	RNO-01
<b>Título:</b>	Desenvolvimento dos algoritmos e técnicas mediante linguaxe de programación C.
<b>Descrición:</b>	Os algoritmos e técnicas deberán estar desenvolvidos empregando a linguaxe de programación C
<b>Importancia:</b>	Crítica.
<b>Prioridade:</b>	Alta.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se os algoritmos e técnicas desenvolveuse empregando a linguaxe de programación C.

Cadro 4.32: Requisito RNO-01: Desenvolvimento dos algoritmos e técnicas mediante linguaxe de programación C.

<b>Identificador:</b>	RNO-02
<b>Título:</b>	O sistema desenvolverase para sistemas operativos Linux.
<b>Descrición:</b>	A implementación debe funcionar sobre un sistema operativo Linux.
<b>Importancia:</b>	Crítica.
<b>Prioridade:</b>	Alta.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se a implementación executa sobre un sistema operativo Linux.

Cadro 4.33: Requisito RNO-02: O sistema desenvolverase para sistemas operativos Linux.

### Requisitos non funcionais externos

O único requisito non funcional externo do sistema detállase no Cadro 4.34.

<b>Identificador:</b>	RNE-01
<b>Título:</b>	Desenvolvemento do módulo para interface gráfica mediante GTK+.
<b>Descrición:</b>	A interface gráfica do módulo de rexistrado deberá desenvolverse empregando a librería GTK+ versión 2.0 e o deseñador de ventanas Glade debido a unha razón de interoperabilidade coa aplicación que integrará este módulo, <i>HypeRvieW</i> .
<b>Importancia:</b>	Crítica.
<b>Prioridade:</b>	Baixa.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se o módulo de rexistrado se desenvolve empregando a librería GTK+.

Cadro 4.34: Requisito RNE-01: Desenvolvemento do módulo para interface gráfica mediante GTK+.

### Requisitos do dominio

Detállanse os requisitos do dominio do sistema entre o Cadro 4.35 e o Cadro 4.36.

<b>Identificador:</b>	RD-01
<b>Título:</b>	O algoritmo deberá rexistrar imaxes hiperespectrais.
<b>Descrición:</b>	O algoritmo ou algoritmos deberán ser capaces de rexistrar imaxes hiperespectrais. Unha imaxe hiperespectral é unha imaxe na que cada píxel ven descrito por un vector de valores espectrais que se corresponden coa contribución da luz detectada nese punto en diferentes bandas do espectro, moito maior que o espectro visible polo ollo humano.
<b>Importancia:</b>	Crítica.
<b>Prioridade:</b>	Alta.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se a aplicación é capaz de aplicar a técnica de rexistrado a imaxes hiperespectrais.

Cadro 4.35: Requisito RD-01: O algoritmo deberá rexistrar imaxes hiperespectrais.

<b>Identificador:</b>	RD-02
<b>Título:</b>	O algoritmo deberá estar baseado na Transformada Rápida de Fourier.
<b>Descrición:</b>	O algoritmo implementado neste traballo deberá empregar a Transformada Rápida Fourier (FFT) para comparar dúas imaxes onde unha está escalada, rotada e/ou desprazada respecto da outra. A Transformada Rápida Fourier é o nome que recibe este eficiente algoritmo que permite calcular a Transformada Discreta de Fourier (DFT) e a súa inversa cun bo rendemento e eficiencia.
<b>Importancia:</b>	Crítica.
<b>Prioridade:</b>	Alta.
<b>Criterio de validación:</b>	O requisito considerárase cumprido se o algoritmo se basea na Transformada Rápida Fourier (FFT) para rexistrar dúas imaxes.

Cadro 4.36: Requisito RD-02: O algoritmo deberá estar baseado na Transformada Rápida de Fourier.

## 4.2. Iteracións

A continuación nesta sección detallaranse as iteracións que se levarán a cabo neste proxecto asociándoas cos requisitos que se deben cumprir en cada unha delas. Os requisitos non funcionais do produto, os requisitos non funcionais de organización, os requisitos non funcionais externos e os requisitos do dominio estarán presentes en todas as iteracións con excepción dos requisitos asociados ao desenvolvemento da interface gráfica (módulo de *HypeRvieW*) por ter unha prioridade baixa e unha importancia optativa. Estes serán incluídos na derradeira iteración, unha vez estea xa implementado os diferentes algoritmos e técnicas de redución de dimensionalidade e se teñan claros que versións son as máis prometedoras e cales se deben descartar, se se dispón de tempo para así simplificarlle o uso ao usuario mediante unha interface gráfica.

Cabe dicir tamén que algúns requisitos estarán presentes en varias iteracións. Isto é normal, pois trátase de deseñar e implementar versións que introduzan melloras polo que moitas veces ese requisito xa estaba cuberto nunha iteración anterior pero cunha menor calidade.

Cabe salientar tamén a inclusión dunha etapa de formación en cada iteración. Isto é así debido a que aínda inicialmente se realizou unha pequena inmersión no dominio da materia a tratar neste traballo, para tamén saber como planificar,

pero será necesario enfocar máis esta formación en cada iteración dependendo do que se realice nela.

### 4.2.1. Iteración 1: Algoritmo FFT

A primeira iteración ten como un dos seus obxectivos realizar unha primeira versión dun algoritmo de rexistrado de imaxes que sente unha estrutura que serva de base para as posterior versións e melloras. Outro obxectivo desta é familiarizarse e formarse no dominio do traballo, pois o usuario é inexperto. Para isto inicialmente este algoritmo, nesta iteración, será desenvolvido para traballar con imaxes en gris dunha única banda. Isto permitirá unha maior e rápida adaptación, formación e comprensión do dominio do problema.

Así, esta iteración abrangue os seguintes requisitos funcionais:

RF-09 Rexistrar unha imaxe a partir doutra tamén proporcionada.

RF-10 Rexistrar unha imaxe a partir doutra auto-xerada.

RF-11 Rotar, escalar e desprazar unha imaxe dunha soa banda.

RF-13 Amosar o ángulo de rotación, o factor de escala e os valores de desprazamento obtidos do rexistrado.

RF-15 Gardar imaxe resultante do proceso de rexistrado en formato PGM.

Debido a grande complexidade de cálculos e funcións que se deberon desenvolver para a implementación do algoritmo, esta iteración será a de maior duración con respecto as outras. A etapa de formación ten un grande peso neste caso en concreto. Ademais búscase realizar xa dende o primeiro un bo produto co fin de asentar unha primeira base sólida.

### 4.2.2. Iteración 2: Imaxes hiperespectrais

Nesta segunda iteración adaptaremos o algoritmo desenvolvido na anterior aplicación para que funcione con imaxes hiperespectrais. Nesta etapa desenvolveranse as funcións para ler ficheiros de datos RAW que conteñen ditas imaxes así como a función que permita gardala no mesmo formato unha vez rexistrada.

Como se discutirá en detalle máis adiante e foi presentado en seccións anteriores, a aplicación das imaxes hiperespectrais ao algoritmo non é directa xa que debido a grande cantidade de datos que conteñen é preciso extraer mediante algún proceso matemático a información máis relevante da imaxe reducindo así a súa dimensionalidade. É por iso que o segundo paso a realizar nesta iteración é a implementación de diferentes técnicas de extracción de características. Estas serán explicadas en máis detalle no Capítulo 6 de Implementación.

Desta maneira os requisitos que engloba esta iteración son:

- RF-01 Cargar ficheiro de datos en formato RAW.
- RF-02 Calcular Compoñentes Principais (PCA) dunha imaxe de entrada.
- RF-03 Calcular gradiente RCMG dunha imaxe de entrada.
- RF-04 Calcular gradiente vectorial dunha imaxe de entrada.
- RF-05 Calcular gradiente RCMG das bandas PCA dunha imaxe de entrada.
- RF-06 Calcular gradiente vectorial das bandas PCA dunha imaxe de entrada.
- RF-07 Aplicar o algoritmo a unha ou varias (de forma individual) bandas PCA.
- RF-08 Calcular a media de unha ou varias bandas consecutivas PCA.
- RF-09 Rexistrar unha imaxe a partir doutra tamén proporcionada.
- RF-10 Rexistrar unha imaxe a partir doutra auto-xerada.
- RF-11 Rotar, escalar e desprazar unha imaxe dunha soa banda.
- RF-12 Rotar, escalar e desprazar unha imaxe hiperespectral.
- RF-13 Amosar o ángulo de rotación, o factor de escala e os valores de desprazamento obtidos do rexistrado.
- RF-14 Gardar imaxe resultante do proceso de rexistrado en formato RAW.
- RF-15 Gardar imaxe resultante do proceso de rexistrado en formato PGM.

Entón ao final desta iteración contaremos cun algoritmo capaz de rexistrar imaxes hiperespectrais cun amplo abanico de técnicas de redución de dimensionalidade que serán aplicadas antes do rexistrado.

### 4.2.3. Iteración 3: Algoritmo gradientes

Esta iteración pretende mellorar o algoritmo desenvolvido nas anterior iteracións investigando na idea de aplicar o rexistrado sobre un determinado tipo de gradiente que nos facilite esa acción e nos permita mellorar a precisión e a robustez a hora de achar o ángulo de rotación, o factor de escala e os valores de desprazamento.

Os requisitos que forman parte desta iteración xa foron implementados nas anteriores iteracións pero como xa se dixo búscase mellorar a calidade do seu funcionamento:

- RF-09 Rexistrar unha imaxe a partir doutra tamén proporcionada.
- RF-10 Rexistrar unha imaxe a partir doutra auto-xerada.

### 4.2.4. Iteración 4: Algoritmo MLFFT

Nesta cuarta iteración trataremos tamén de mellorar o algoritmo implementado nas Iteracións 1 e 2 xa que existen diversos factores que non garanten a mellor precisión a hora de achar o ángulo de rotación, o factor de escala e os valores

de desprazamento. Para isto investigárase na introdución da Transformada de Fourier Fraccional no algoritmo, explicada no Capítulo 6 de Implementación con todo detalle. Isto implicará unha nova formación como nas etapas anteriores.

Unha vez se teña a implementación completa da lóxica da ferramenta de rexistrado, realizarase unha interface por liña de comandos para que o usuario poida configurar e executar toda a casuística que este traballo propón.

Os requisitos que engloba esta iteración son:

RF-09 Rexistrar unha imaxe a partir doutra tamén proporcionada.

RF-10 Rexistrar unha imaxe a partir doutra auto-xerada.

RF-16: Interface por liña de comandos.

De novo os dous primeiros requisitos foron incluídos en anteriores etapas mais como xa se dixo o que se pretende é mellorar a calidade do funcionamento do algoritmo creando variantes e melloras.

#### 4.2.5. Iteración 5: Introdución do rexistrado como módulo da ferramenta *HypeRvieW*

Unha vez se teña a implementación completa da lóxica dos algoritmos e das técnicas de redución de dimensionalidade e extracción de características, realizarase un módulo que integra as mellores solucións desenvolvidas neste traballo para a aplicación *HypeRvieW* de análise e clasificación de imaxes hiperespectrais. A inclusión dos métodos desenvolvidos nunha interface gráfica permite un uso, unha iteración e un entendemento máis doado de cara aos usuarios finais.

Todos os requisitos que se desenrolan nesta iteración teñen na especificación unha importancia optativa. Isto é así debido a que non son necesarios para a consecución dos obxectivos do proxecto e que esta iteración non foi formulada inicialmente no alcance do proxecto, xurdindo a idea durante o desenvolvemento do traballo. Grazas ao modelo de ciclo de desenrolo que se emprega permítenos engadir esta iteración e estes requisitos ao traballo sen realizar ningún cambio no realizado ata ese punto. En definitiva, esta iteración só se desenvolverá se se dispón de tempo suficiente dentro da planificación do traballo, como así foi.

Os requisitos que integran esta iteración son todos aqueles que teñen que ver coa interface gráfica (do RF-17 ao RF-23) así como outros que son comúns coa ferramenta de rexistrado por liña de comandos:

- RF-01 Cargar ficheiro de datos en formato RAW.
- RF-02 Calcular Componentes Principais (PCA) dunha imaxe de entrada.
- RF-07 Aplicar o algoritmo a unha ou varias (de forma individual) bandas PCA.
- RF-08 Calcular a media de unha ou varias bandas consecutivas PCA.
- RF-10 Rexistrar unha imaxe a partir doutra auto-xerada.
- RF-11 Rotar, escalar e desprazar unha imaxe dunha soa banda.
- RF-12 Rotar, escalar e desprazar unha imaxe hiperespectral.
- RF-13 Amosar o ángulo de rotación, o factor de escala e os valores de desprazamento obtidos do rexistrado.
- RF-14 Gardar imaxe resultante do proceso de rexistrado en formato RAW.
- RF-15 Gardar imaxe resultante do proceso de rexistrado en formato PGM.
  
- RF-17 Crear módulo para *HypeRvieW* cos mellores algoritmos e técnicas de redución de dimensionalidade desenvolvidos (interface gráfica).
- RF-18 Permitir especificar parámetros numéricos do proceso de rexistrado.
- RF-19 Permitir elixir algoritmo.
- RF-20 Permitir elixir técnica de redución de dimensionalidade.
- RF-21 Amosar imaxe hiperespectral de entrada.
- RF-22 Amosar imaxe resultante do proceso de rexistrado.
- RF-23 Ver e gardar a saída textual do proceso de rexistrado.

Tamén forman parte aqueles requisitos non funcionais e do dominio que se definiron especificamente para interface gráfica:

- RNP-03 A interface gráfica deberá contar cunha alta usabilidade, eficiencia, eficacia e fiabilidade.
- RNP-04 A interface gráfica do módulo de rexistrado debera incluír unha axuda.
- RNE-01 Desenvolvemento do módulo para interface gráfica mediante GTK+.

### 4.3. Casos de uso

Nesta sección preséntase o diagrama de casos de uso do sistema o cal representa as interaccións entre o usuario e a ferramenta que se vai desenvolver. Neste diagrama preténdese capturar o comportamento desexado da ferramenta de rexistrado e do módulo para a aplicación *HypeRvieW* sen especificar como implementalos facilitando así a comunicación e o entendemento entre os usuarios, clientes e desenvolvedores, sendo esta unha das súas principais vantaxes. Noutras palabras, os casos de uso representan unidades funcionais dun sistema nos que un ou máis actores interaccionan con el para levar a cabo accións definidas. Estes foron deseñados a partir dos requisitos recollidos do cliente.

Inicialmente amósase o diagrama principal do sistema construído seguindo a

linguaxe unificada de modelado (UML), de seguido detallarase cada caso de uso e actor participante e finalmente preséntase a matriz de trazabilidade que relaciona os requisitos cos casos de uso.

### 4.3.1. Diagrama de casos de uso

O diagrama de casos de uso recolle aquelas accións e comportamentos que o usuario pode levar a cabo no sistema, como xa se dixo na presentación desta sección. Pretende ser unha ferramenta que facilite o entendemento co cliente e cos usuarios e que permita cunha simple visualización aportar unha idea do que se pretende desenvolver.

As compoñentes deste tipo de diagramas que se van empregar neste traballo son as seguintes:

- **Caso de uso:** Conxunto de secuencias de accións que executa un sistema para producir un resultado observable para un actor. A súa representación gráfica é un óvalo.
- **Asociación:** Relación entre casos de uso e actores que os levan a cabo. Representase mediante unha liña continua sen frechas.
- **Relación:** Relación entre casos de uso. Representase mediante unha liña descontinua con frecha. Hai diferentes tipos, aquí explícanse os empregados no diagrama da Figura 4.1:
  - **Inclusión:** Un caso de uso incorpora o comportamento de outro. Indícase graficamente cunha nota de texto «*include*» na frecha da relación.
  - **Extensión:** Un caso de uso modifica o comportamento de outro só en certos puntos. Indícase graficamente cunha nota de texto «*extend*» na frecha da relación.
- **Actor:** Rol que xoga un usuario ou un sistema externo ao interaccionar co sistema. No noso caso non se conta con ningún sistema externo. Representase graficamente por unha persoiña.

Na Figura 4.1 pódese ver o diagrama de casos de uso do sistema que se desenvolve neste traballo.

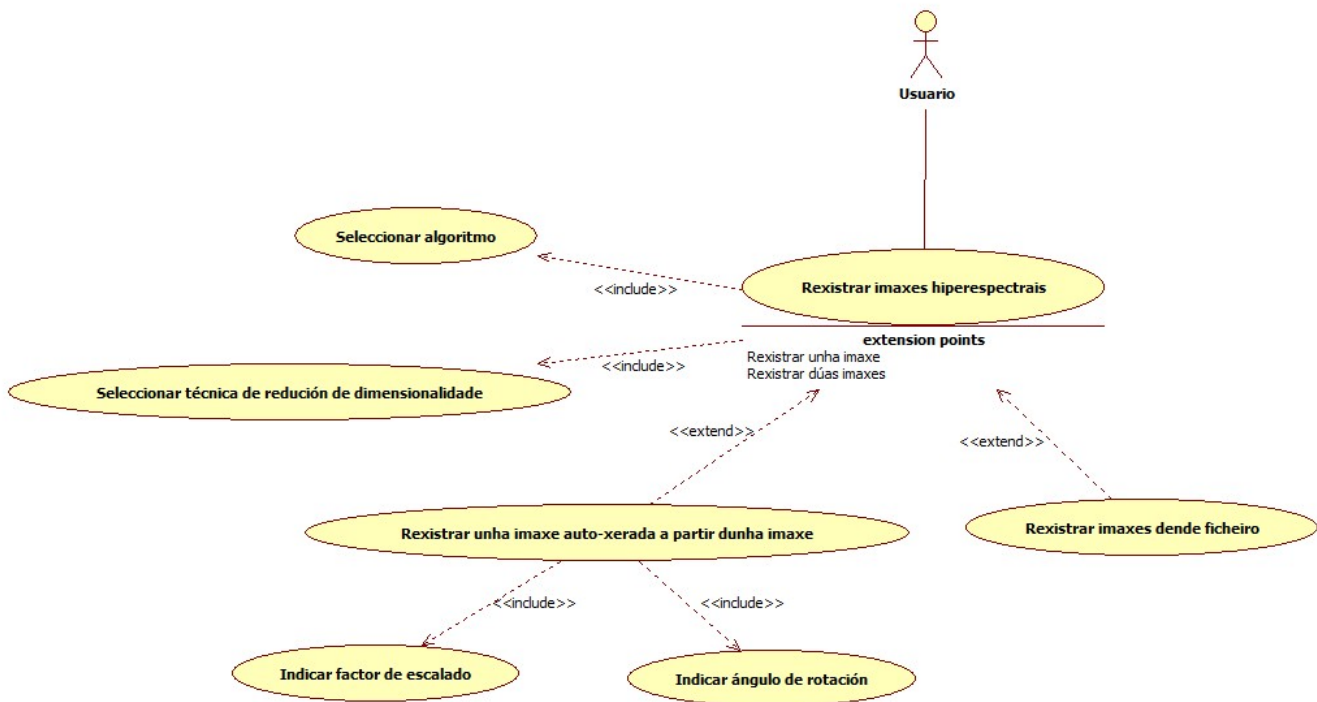


Figura 4.1: Diagrama de casos de uso.

### 4.3.2. Especificación de casos de uso

De seguido detállanse os actores e casos de uso modelados para a realización deste traballo. Seguirase a estrutura amosada no Cadro 4.37 para a especificación de actores e a amosada no Cadro 4.38 para o detalle dos casos de uso.

Cabe dicir que só se especificarán os casos de uso *Registrar unha imaxe auto-xerada a partir dunha imaxe* e *Registrar imaxes dende ficheiro* xa que os outros trátanse de casos de uso incluídos nestes, ou do caso de uso que engloba aos dous.

A ferramenta de rexistrado implementa ámbolos dous casos de uso, mentres que o módulo de rexistrado desenvolvido para *HypeRvieW* só CU-01 (Cadro 4.40).

<b>Actor:</b>	Nome único que identifica o actor.
<b>Descrición:</b>	Descrición e relación do actor co sistema.
<b>Fontes:</b>	<i>Stakeholders</i> que axudaron a identificación do actor.

Cadro 4.37: Especificación dun actor.

<b>Identificador:</b>	Clave única que identifica cada caso de uso. Estará formada polo código CU- seguido por un número.
<b>Título:</b>	Nome asociado ao caso de uso.
<b>Propósito:</b>	Descrición do caso de uso.
<b>Actores:</b>	Nome do actor ou actores que participan no caso de uso.
<b>Precondición:</b>	Condición que se debe cumprir para realizar a acción asociada ao caso de uso.
<b>Postcondición:</b>	Estado no que queda o sistema despois dunha execución correcta da acción ou accións asociadas ao caso de uso.
<b>Escenario principal:</b>	Lista de actividades que se realizarán nunha execución normal e válida do caso de uso.
<b>Escenario alternativo:</b>	Lista de actividades que se realizarán nunha situación distinta ao curso normal dos eventos. O inicio da numeración do escenario alternativo comeza no punto seguinte no que se produce o desvío do escenario principal.

Cadro 4.38: Especificación dun caso de uso.

<b>Actor:</b>	Usuario.
<b>Descrición:</b>	Persoa que empregue o sistema desenvolvido.
<b>Fontes:</b>	Cliente e desenvolvidor do sistema.

Cadro 4.39: Actor: Usuario.

<b>Identificador:</b>	CU-01
<b>Título:</b>	Rexistrar unha imaxe auto-xerada a partir dunha imaxe.
<b>Propósito:</b>	Achar o ángulo de rotación, factor de escala e desprazamento dunha imaxe respecto da outra que é xerada pola aplicación a partir dos parámetros indicados polo usuario.
<b>Actores:</b>	Usuario.
<b>Precondición:</b>	O usuario debe indicar a localización da imaxe hiperespectral de referencia, o seu tamaño, o número de bandas, un ángulo, un factor de escalado e uns valores de desprazamento para xerar a imaxe a rexistrar.
<b>Postcondición:</b>	Amósase o resultado por pantalla e xérase a imaxe resultante do proceso.
<b>Escenario principal:</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. O usuario indica unha imaxe, un factor de escala, un ángulo de rotación e uns valores de desprazamento. Selecciona o algoritmo de rexistrado que quere empregar e a técnica de redución de dimensionalidade a aplicar.</li> <li>2. O sistema amosa por consola o resultado e xera a imaxe resultante do proceso no directorio onde se atopa o programa.</li> </ol>
<b>Escenario alternativo:</b>	1a. O usuario non indica a localización da imaxe, o tamaño, o número de bandas, o factor de escala, o ángulo de rotación e/ou os valores de desprazamento.

Cadro 4.40: Caso de uso CU-01: Rexistrar unha imaxe auto-xerada respecto a unha imaxe.

<b>Identificador:</b>	CU-02
<b>Título:</b>	Rexistrar imaxes dende ficheiro.
<b>Propósito:</b>	Achar o ángulo de rotación, factor de escala e desprazamento dunha imaxe respecto da outra. Ambas atópanse almacenadas en senllos ficheiros.
<b>Actores:</b>	Usuario.
<b>Precondición:</b>	O usuario debe indicar a localización das imaxes hiperespectrais, a de referencia e a imaxe a rexistrar, os seus tamaños e número de bandas.
<b>Postcondición:</b>	Amósase o resultado por pantalla e xérase a imaxe resultante do proceso.
<b>Escenario principal:</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. O usuario indica a localización dunha imaxe de referencia e doutra a rexistrar así como os seus tamaños e número de bandas. Selecciona o algoritmo de rexistrado que quere empregar e a técnica de redución de dimensionalidade a aplicar.</li> <li>2. O sistema amosa por consola o resultado e xera a imaxe resultante do proceso no mesmo directorio onde se atopaba a orixinal.</li> </ol>
<b>Escenario alternativo:</b>	1a. O usuario non indica a localización da imaxe ou das imaxes, ou o seu tamaño ou o número de bandas.

Cadro 4.41: Caso de uso CU-02: Rexistrar imaxes dende ficheiro

### 4.3.3. Matriz de trazabilidade

A matriz de trazabilidade amosa como se relacionan os casos de uso e os requisitos, é dicir, serve para identificar en que escenarios se recollen os diferentes requisitos. Mediante esta matriz podemos ver que todos os requisitos identificados foron modelados e representados no diagramas de uso. É por isto, que a matriz de trazabilidade é unha boa ferramenta da que debemos de botar man á hora de realizalas probas de aceptación para comprobar que se cubriron todos os requisitos e casos de uso. Pódese ver a matriz do sistema desenvolvido neste traballo no Cadro 4.42.

	CU-01	CU-02
RF-01	•	•
RF-02	•	•
RF-03	•	•
RF-04	•	•
RF-05	•	•
RF-06	•	•
RF-07	•	•
RF-08	•	•
RF-09		•
RF-10	•	
RF-11	•	•
RF-12	•	•
RF-13	•	•
RF-14	•	•
RF-15	•	•
RF-16	•	•
RF-17	•	
RF-18	•	
RF-19	•	
RF-20	•	
RF-21	•	
RF-22	•	
RF-23	•	

Cadro 4.42: Matriz de trazabilidade.



# Capítulo 5

## Deseño

Neste capítulo presentaranse as tecnoloxías e linguaxes de programación escollidas para o desenvolvemento deste Traballo de Fin de Grao e xustificarse a súa elección fronte outras alternativas.

Por outra banda presentarase un diagrama de fluxo da estrutura base do algoritmo baseado na Transformada Rápida de Fourier (FFT) que se vai empregar para a súa implementación así como dos diagramas de fluxo de datos que nos permiten comprender dun xeito máis cómodo e sinxelo a totalidade da estrutura do produto desenvolvido.

Ao final do capítulo amosarase o modelo de datos empregado.

### 5.1. Tecnoloxías e linguaxes de programación

Nesta sección descríbense as diferentes tecnoloxías e linguaxes de programación necesarias para desenvolver este proxecto xustificando o seu uso fronte a outras posibles alternativas.

- **C:** Aínda que xa estaba fixado como requisito por parte do cliente que se debería implementar o sistema en linguaxe C, analizouse Python coma alternativa por se fora máis prometedora xa que tamén é unha linguaxe moi empregada neste eido. Mais desbotouse debido a que Python fronte a C é máis ineficiente dado que é unha linguaxe interpretada e ademais tratándose de xestionar un grande conxunto de datos (imaxes hiperespectrais) en memoria o tempo de computación dispararíase fronte a C. Por outra banda ao ser un proxecto de investigación é necesario coñecer exactamente todos os detalles do que se está realizando. Ademais realizar a implementación inicial en C permitirá dunha maneira máis doada e directa

a transformación deste código a CUDA-C para así poder executar o algoritmo desenvolvido sobre GPUs de Intel e explotar as características que nos brinda a computación de altas prestacións das tarxetas gráficas máis modernas.

- **Librería FFTW3** [25]: é unha librería escrita en C que nos permite calcular a Transformada de Fourier Discreta (DFT) de unha ou máis dimensións para entradas de diferentes tamaños con unha moi boa eficiencia computacional.

A implementación da Transformada de Fourier (FT) en computación non é doada debido a súa alta complexidade. Inicialmente implementouse a FT por medio dun algoritmo de Transformada Rápida de Fourier (FFT) mediante código propio, mais observouse que cando se empregaban conxuntos de datos moi grandes era moi ineficiente fronte a librería FFTW3. Debido a isto, e despois dunha análise, decidiuse optar por usar esta librería amplamente estendida no ámbito do procesado dixital de sinais.

## 5.2. Diagrama de fluxo

Un diagrama de fluxo é a representación gráfica que ilustra a secuencia das operacións que se realizan para conseguir a solución dun problema. É por isto que son moi usados a hora de deseñar algoritmos xa que un algoritmo non deixa de ser unha secuencia de pasos ou procesos lxicamente relacionados entre si para obter unha solución a un problema.

Os elementos empregados nesta representación gráfica son explicados a continuación:

- **Terminal:** Representase a un símbolo terminal mediante un rectángulo coas arestas máis pequenas curvas. Indican o inicio ou a terminación do fluxo.
- **Operación:** Representase por un rectángulo. Representa a realización dunha operación ou actividade relativas ao procedemento.
- **Decisión ou alternativa:** Representase por un rombo. Indica un punto dentro do fluxo no que son posíbeis varios camiños alternativos.
- **Ficheiro definitivo:** Representase por un triángulo cara abaixo. Representa que se almacena un ficheiro permanente.
- **Datos entrada:** Representase por un paralelogramo. Representa datos a ser lidos. No noso caso as imaxes e o número de picos a avaliar que son indicados polo usuario.

- **Pantalla:** Representase por unha especie de rectángulo onde unha das súas arestas pequenas está formada por dúas arestas e un vértice e a outra ten forma curva. Representa que se amosan datos por pantalla.

Na Figura 5.1 pódese ver o diagrama que foi realizado no proceso de deseño e busca representar a estrutura base do algoritmo que se quere desenvolver neste proxecto. Na sección vindeira, nos diagramas de fluxo de datos, detallarase como os datos son transformados en cada paso e na sección de implementación adicada ao algoritmo (Sección 6.2.3) definirase con toda precisión a función que se realiza en cada proceso do diagrama de fluxo.

### 5.3. Diagramas de fluxo de datos

A continuación expoñeranse os diagramas de fluxos (DFD) que representan o algoritmo implementado neste traballo. Os diagramas de fluxo de datos céntranse en representar o que fai o algoritmo e descríbese como un conxunto de operacións que procesan información. Estas operacións reciben fluxos de datos de entrada que transforman en fluxos de datos de saída. Este tipo de diagramas son unha técnica gráfica idónea para representar este fluxo de información.

Esta técnica permítenos modelar sistemas describindo que funcións son as que realiza, que interacción se realizan entre estas funcións, que transformacións de datos realiza o sistema e que datos de entrada se transforman en que datos de saída. Este traballo está repleto de transformacións de datos e de fluxo de datos entre uns procesos e outros, é pois, polo que este tipo de diagrama colle máis forza para poder entender e posteriormente implementar o algoritmo.

Para realizalos diagramas de fluxo de datos empregaremos a notación de Yourdon. Esta notación está formada polos seguintes elementos:

- **Procesos:** Descríbense graficamente mediante un círculo. Representan elementos que transforman información. Son compoñentes que realizan unha das funcións do sistema transformando datos de entrada en datos de saída. Levan asociado un número e un nome.
- **Entidades externas:** Descríbense graficamente mediante un cadrado. Representan elementos do sistema informático ou de outros sistemas adxacentes que producen información que vai ser transformada polo software ou que consumen información transformada polo software. Os fluxos entre unidades externas nunca deben representarse xa que non son obxecto de estudo. Ademais as entidades externas só aparecen no diagrama de contexto.

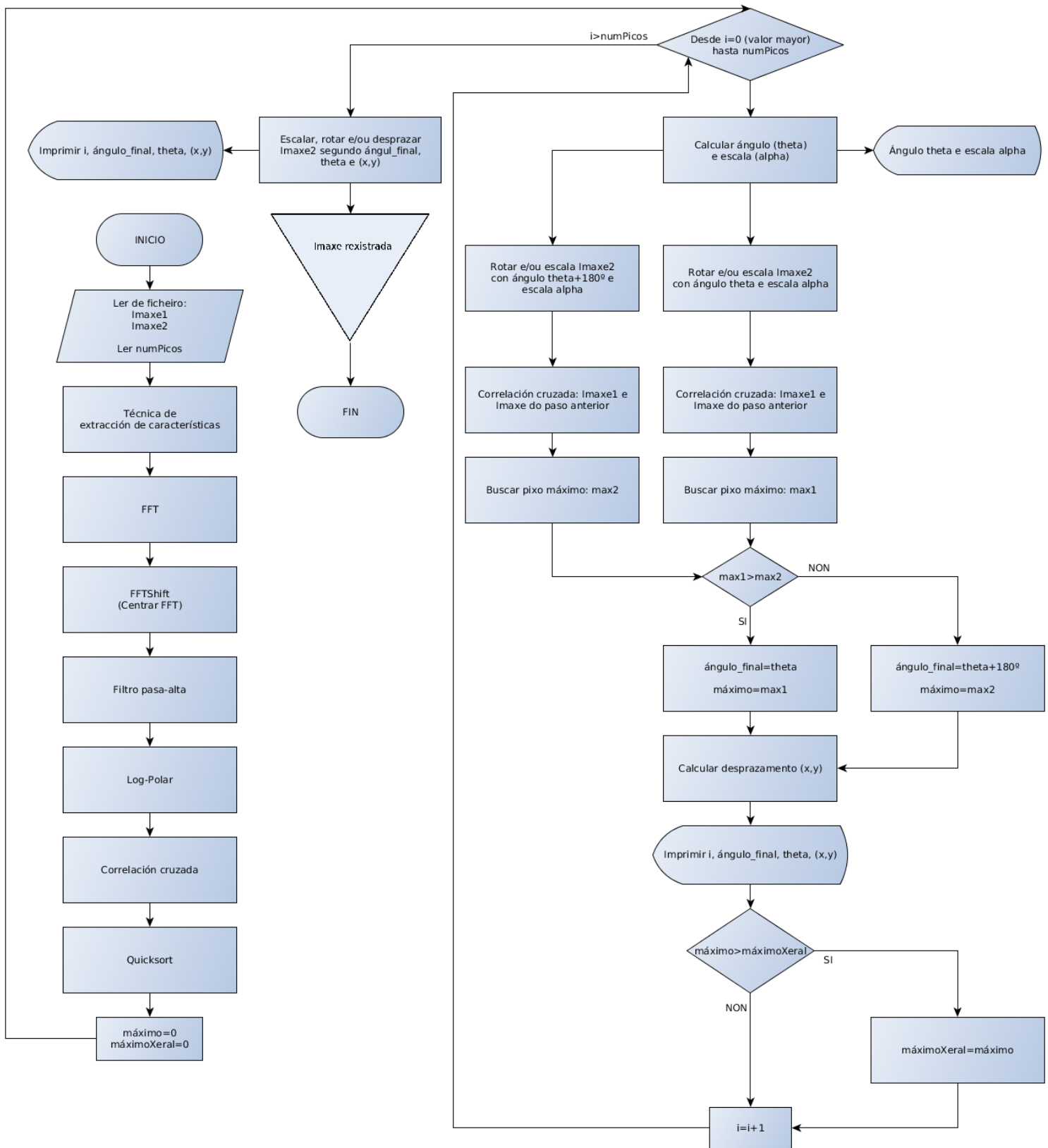


Figura 5.1: Diagrama de fluxo do algoritmo

- **Almacéns de datos:** Descríbense graficamente por dúas barras paralelas. Representan información almacenada que pode ser empregada polo software. Os almacéns de datos poden ir dende rexistros temporais para almacenar datos ata ficheiros ou bases de datos.
- **Fluxos de datos:** Descríbense graficamente por frechas que levan asociado un nome. Representan datos ou coleccións de datos que flúen a través do sistema. A frecha indica o sentido do fluxo. É frecuente que en diagramas de maior nivel existan fluxos de datos bidireccionais (con unha frecha en cada punta do segmento), que máis tarde son refinados en sucesivos diagramas. Estes fluxos conectan procesos con outros procesos, con entidades externas ou con almacéns de datos e poden converxer ou diverxer. Representan información en movemento, fronte aos almacéns que representan información estática ou en repouso.

Calquera destes elementos deben aparecer no diagrama etiquetada cun nome corto e significativo que debe ser único no conxunto de diagramas de fluxo de datos. Ademais co fin de conseguir un modelado correcto seguíronse as seguintes regras de construción [24]:

- Un DFD debe ter menos de 10 elementos.
- Cada elemento debe estar etiquetado cun nome corto e identificable.
- É necesario numerar os procesos.
- Para modelar sistemas complexos emprégase a explosión, que dá como resultado diagramas a distintos niveis de detalle.
- Non é conveniente empregar máis de 7 ou 8 niveis.
- Os diagramas de niveis inferiores desenvolven de forma máis concreta os procesos de niveis superiores.
- A explosión realízase ata conseguir un nivel de especificación sinxelo e mínimo.
- Debe manterse a consistencia de nomes nos distintos diagramas.
- Debe manterse a consistencia entre os diferentes niveis, empregando a chamada regra de reequilibrio. Esta regra dinos que cada DFD fillo dun nivel  $n$  será resultado da explosión dun proceso pai dun DFD de nivel  $n - 1$ . É necesario que o título do DFD sexa o nome do proceso que desenvolve e detalla, que a numeración dos procesos do DFD fillo se derive da do número do pai e ademais hai que manter a consistencia do fluxo de datos en ambos.

- Cada DFD fillo debe representar os mesmos fluxos de datos que no proceso pai.
- Non existen conexións entre entidades externas.
- Non existen conexións entre almacéns.
- Non existen conexións entre entidades externas e almacéns de datos.

Nas seguintes subseccións pasarase a describir os diferentes niveis de diagrama de fluxo que forman o algoritmo base desenvolvido neste traballo. Todos estes diagramas son moi útiles a hora de entender en que fases e procesos está formado o proceso e que tipo de información entra e sae de cada un.

### 5.3.1. Diagrama de contexto

O diagrama de fluxo de datos de nivel 0 recibe o nome de diagrama de contexto e nel o sistema está representado por un só proceso. Este proceso identifica cal é a función principal do sistema, amosando ademais os fluxos de información que o relacionan con outros sistemas. Este diagrama resume o requisito principal do sistema amosando que entradas recibe, con que función as procesa e que saídas xera.

O requisitos principal deste traballo é realizalo rexistrado de imaxes hiperespectrais e para iso contaremos cos parámetros que nos especifique o usuario e cos ficheiros das imaxes. A saída poderá ser amosada por pantalla e por ficheiro. Isto ven reflectido na Figura 5.2.

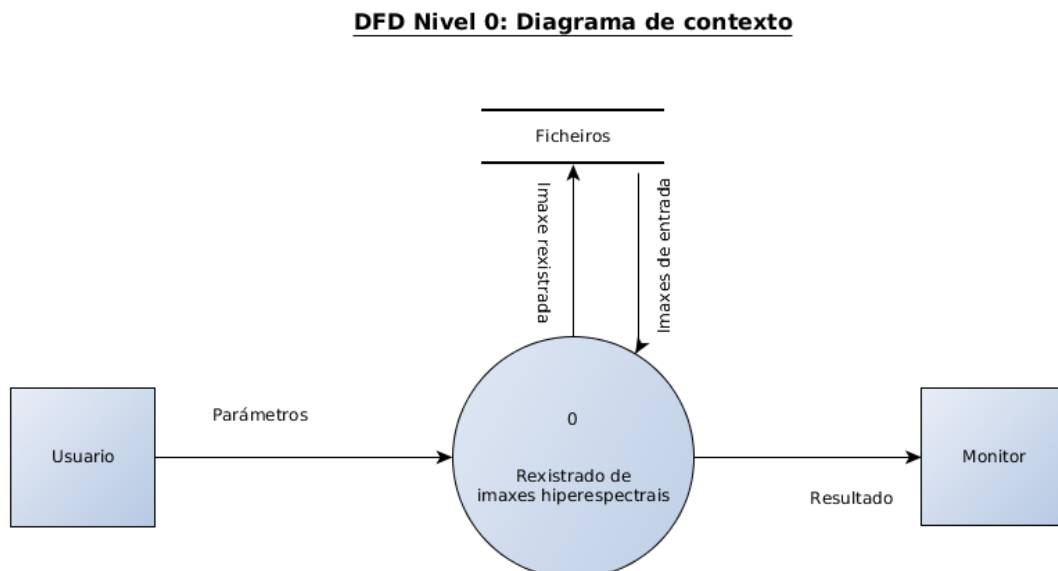


Figura 5.2: Diagrama de contexto do sistema

### 5.3.2. Diagrama do sistema

O diagrama do sistema é o resultante de explotar o proceso 0 do diagrama de contexto. Representa as funcións principais que realiza o sistema e que son independentes entre si. Estas son a aplicación dunha técnica de extracción de características para a redución da dimensionalidade dunha imaxe hiperespectral antes de realizalo rexistrado e o propio proceso do rexistrado das imaxes. Podemos ver este diagrama na Figura 5.3.

#### DFD Nivel 1: Diagrama do sistema

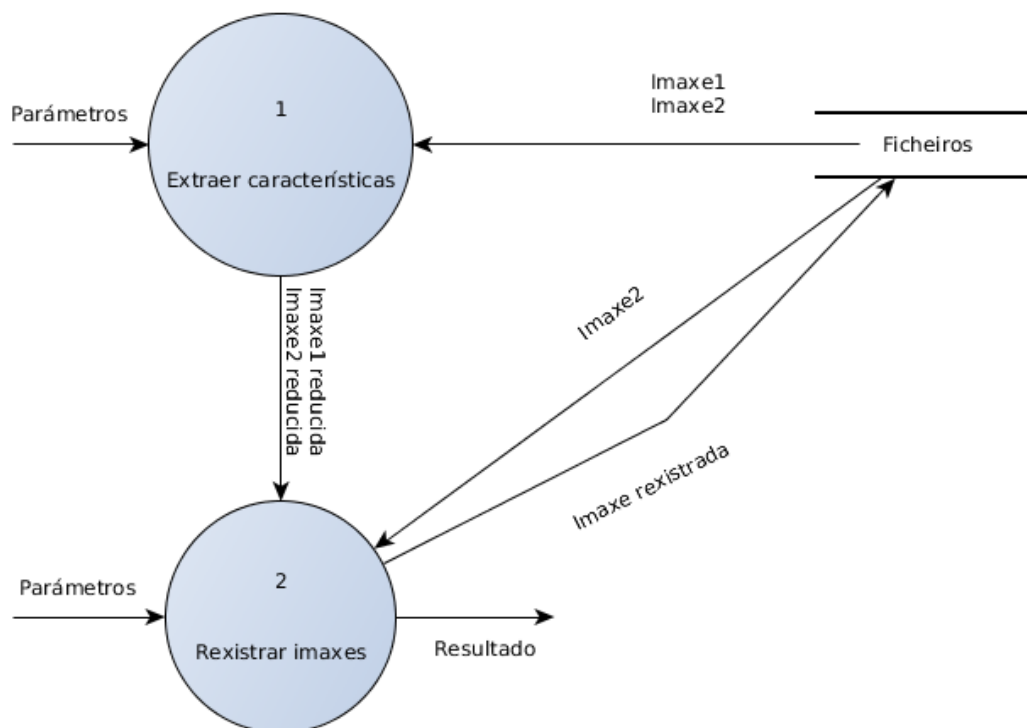


Figura 5.3: DFD de nivel 1 ou diagrama do sistema

### 5.3.3. Diagramas de nivel dous

A continuación amósanse os diagramas que xorden de explotar os dous procesos que forman parte do diagrama do sistema.

No diagrama da Figura 5.4 pódese ver a explosión do proceso “Extraer características” onde primeiro se len as imaxes de ficheiro e se transforman a estrutura de datos que emprega o sistema e despois se aplica a técnica de extracción de características propiamente dita. Estes procesos cualifícanse de primitivos pois xa non se pasará a explotalos máis en novos niveis de DFD debido a que a súa descomposición non implicaría unha maior comprensión do sistema e só engadiría complexidade.

### **DFD Nivel 2: Extraer características**

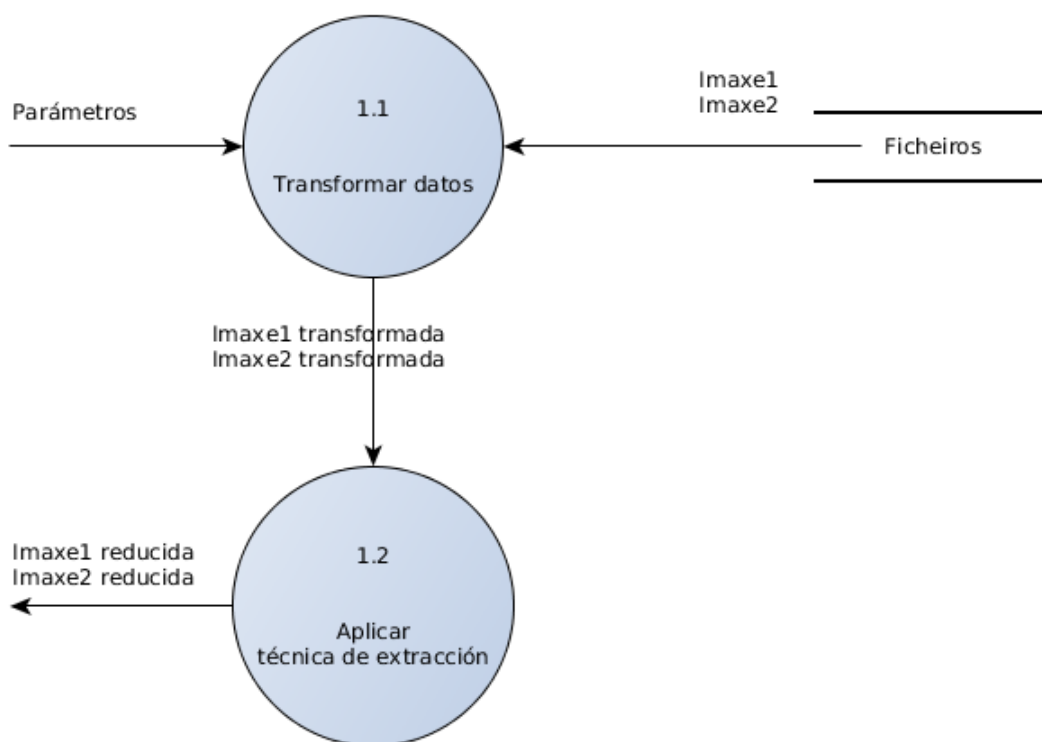


Figura 5.4: DFD de nivel 2: Extraer características

Por outro lado na Figura 5.5 pódese ver o diagrama froito da explosión do proceso “Rexistrar imaxes”. Está formado por tres procesos: “Achar ángulo e escala”, “Achar desprazamento” e “Procesar resultados”.

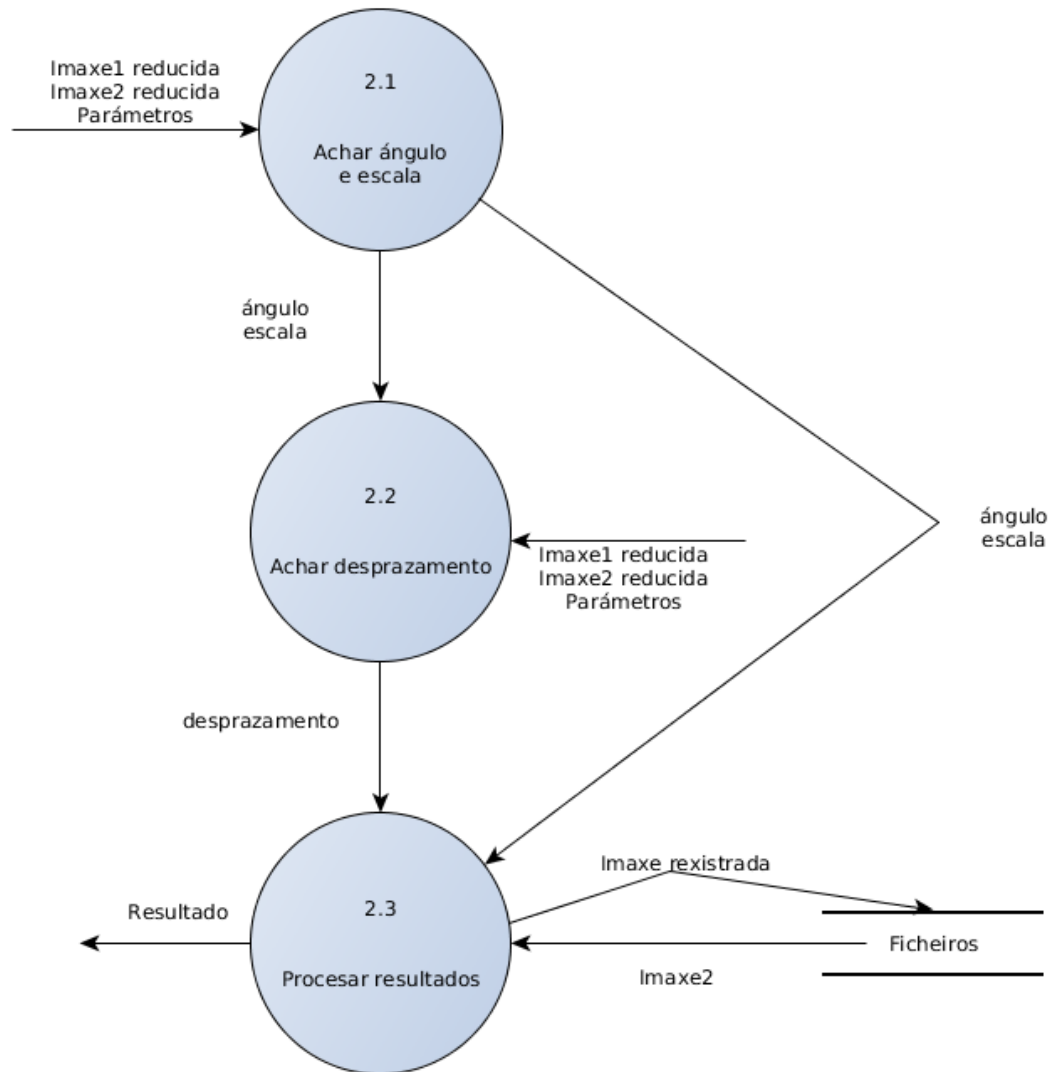
**DFD Nivel 2: Rexistrar imaxes**

Figura 5.5: DFD de nivel 2: Rexistrar imaxes

**5.3.4. Diagramas de nivel tres**

Da explosión dos procesos que conforman o diagrama de fluxo de datos de nivel 2 "Rexistrar imaxes" nacen cadanseu diagrama de nivel tres que amosamos a continuación.

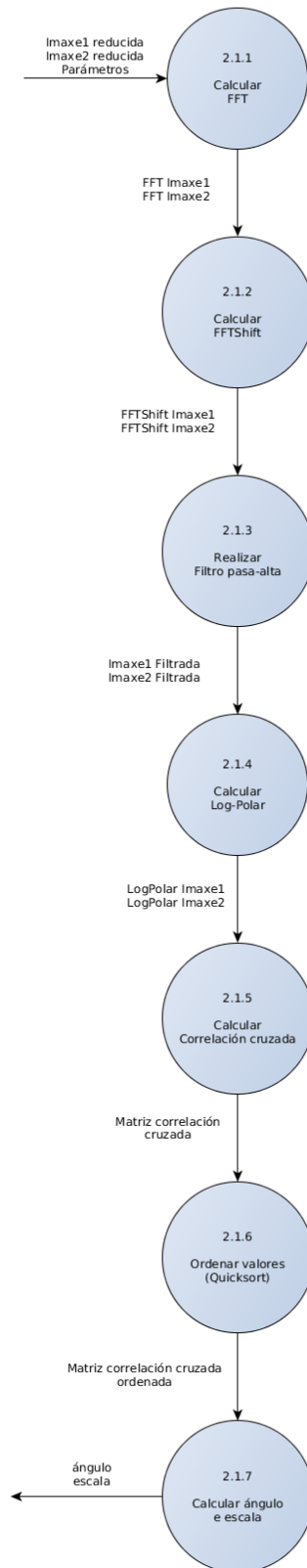
**DFD Nivel 3: Achar ángulo e escala**

Figura 5.6: DFD de nivel 3: Achar ángulo e escala

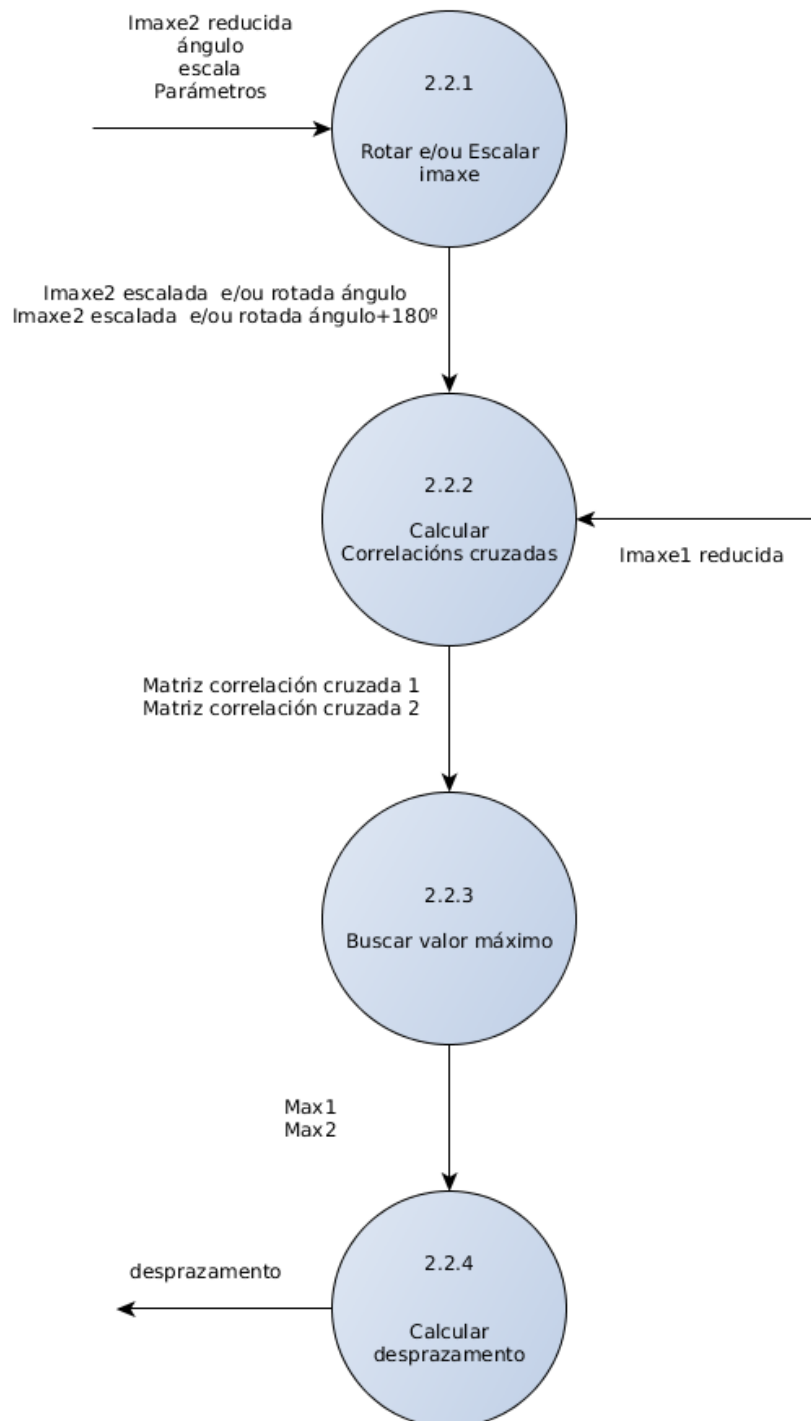
**DFD Nivel 3: Achar desprazamento**

Figura 5.7: DFD de nivel 3: Achar desprazamento

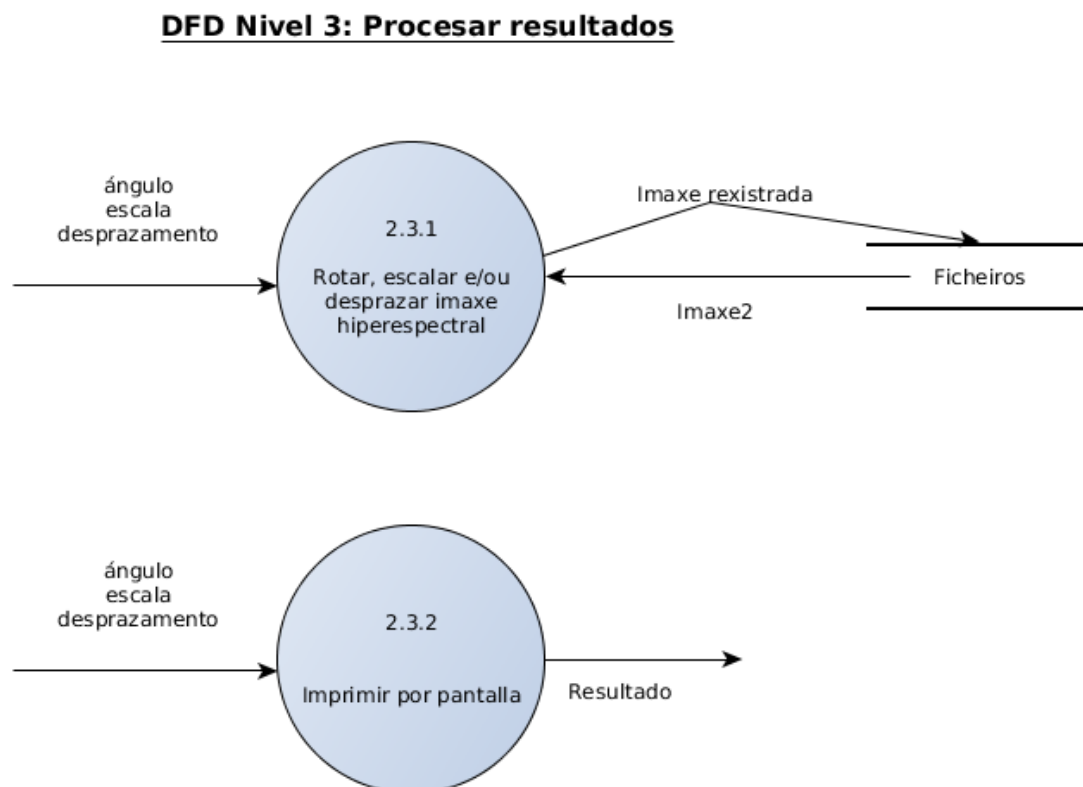


Figura 5.8: DFD de nivel 3: Procesar resultados

Na Figura 5.6 amósanse as fases que conforman o proceso de obtención do ángulo e escala no rexistrado de imaxes baseado na Transformada Rápida de Fourier (FFT). Por outra banda, na Figura 5.7 ensínase en máis detalle o proceso de obtención do desprazamento. Os procesos que conforman estes dous diagramas serán explicadas con maior detalle na vindeira sección, Implementación. Finalmente desenvólvese na Figura 5.8 o diagrama de procesado de resultados, onde se pode ver que estes resultados se amosaran por pantalla e que tamén se producirá a imaxe rexistrada.

### 5.3.5. Dicionario de datos

O dicionario de datos contén as definicións de todos os elementos que aparecen nos diferentes diagramas do sistema, e serven por tanto para establecer a relación entre os distintos modelos do mesmo. Noutras palabras, é un listado organizado de todos os elementos de datos que son pertinentes para o sistema, con definicións precisas e rigorosas que permiten que o usuario e o analista do sistema teñan unha mesma comprensión das entradas, saídas e compoñentes dos almacéns.

Con este fin descrito detállase a continuación o dicionario de datos para os diagramas de fluxo das anteriores seccións.

### Almacéns de datos

<b>Nome:</b>	Ficheiros.
<b>Fluxos entrantes:</b>	Imaxe rexistrada
<b>Fluxos saíntes:</b>	Imaxe1 e Imaxe2
<b>Descrición do contido:</b>	Ficheiros de imaxes hiperespectrais.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Formato do ficheiro: RAW.

Cadro 5.1: Almacén de datos: Ficheiros

### Entidades externas

<b>Nome:</b>	Usuario.
<b>Fluxos entrantes:</b>	-
<b>Fluxos saíntes:</b>	Parámetros
<b>Descrición do contido:</b>	Parámetros de configuración aportados polo usuario como pode ser o algoritmo escollido e o método de extracción de características.
<b>Comentarios adicionais:</b>	-

Cadro 5.2: Entidade externa: Usuario

<b>Nome:</b>	Monitor.
<b>Fluxos entrantes:</b>	Resultado
<b>Fluxos saíntes:</b>	-
<b>Descrición do contido:</b>	Resultados despois da realización do rexistrado das imaxes.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Modo texto.

Cadro 5.3: Entidade externa: Monitor

## Procesos

<b>Identificador:</b>	0
<b>Nome:</b>	Rexistrado de imaxes hiperespectrais.
<b>Fluxos entrantes:</b>	Parámetros e Imaxes de entrada
<b>Fluxos saíntes:</b>	Resultado e Imaxe rexistrada
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso resume de todo o sistema. Realiza a lectura das imaxes hiperespectrais, reduce a súa dimensionalidade, aplícalle o algoritmo de rexistrado e procesa e devolve o resultado dese proceso.

Cadro 5.4: Proceso: Rexistrado de imaxes hiperespectrais

<b>Identificador:</b>	1
<b>Nome:</b>	Extraer características.
<b>Fluxos entrantes:</b>	Parámetros, Imaxe1 e Imaxe2
<b>Fluxos saíntes:</b>	Imaxe1 reducida e Imaxe2 reducida
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso que realiza a lectura das imaxes hiperespectrais e reduce a súa dimensionalidade para así poder aplicarlle o método de rexistrado a un conxunto menor de datos.

Cadro 5.5: Proceso: Extraer características

<b>Identificador:</b>	2
<b>Nome:</b>	Rexistrar imaxes.
<b>Fluxos entrantes:</b>	Parámetros, Imaxe2, Imaxe1 reducida e Imaxe2 reducida.
<b>Fluxos saíntes:</b>	Imaxe rexistrada e Resultado.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso que aplica o algoritmo de rexistrado as imaxes despois de ser reducidas e devolve o resultado do rexistrado tanto por ficheiro como por pantalla.

Cadro 5.6: Proceso: Rexistrar imaxes

<b>Identificador:</b>	1.1
<b>Nome:</b>	Transformar datos.
<b>Fluxos entrantes:</b>	Parámetros, Imaxe1 e Imaxe2.
<b>Fluxos saíntes:</b>	Imaxe1 transformada e Imaxe2 transformada.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso que le os ficheiros RAW e os transforma a un modelo de datos (especificado na Sección 5.4) co que poida traballar o sistema.

Cadro 5.7: Proceso: Transformar datos

<b>Identificador:</b>	1.1
<b>Nome:</b>	Aplicar técnica de extracción.
<b>Fluxos entrantes:</b>	Imaxe1 transformada e Imaxe2 transformada.
<b>Fluxos saíntes:</b>	Imaxe1 reducida e Imaxe2 reducida.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso que lle aplica unha técnica de extracción de características, e polo tanto reduce a dimensionalidade, das imaxes hiperespectrais.

Cadro 5.8: Proceso: Aplicar técnica de extracción

<b>Identificador:</b>	2.1
<b>Nome:</b>	Achar ángulo e escala.
<b>Fluxos entrantes:</b>	Parámetros, Imaxe1 reducida e Imaxe2 reducida.
<b>Fluxos saíntes:</b>	Ángulo e escala.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso que forma parte do rexistrado das imaxes e que acha o ángulo de rotación e o factor de escala que diferencian unha imaxe da outra.

Cadro 5.9: Proceso: Achar ángulo e escala.

<b>Identificador:</b>	2.2
<b>Nome:</b>	Achar desprazamento.
<b>Fluxos entrantes:</b>	Parámetros, Imaxe1 reducida, Imaxe2 reducida, ángulo e escala.
<b>Fluxos saíntes:</b>	Desprazamento.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso que forma parte do rexistrado das imaxes e que acha o desprazamento que diferencia unha imaxe da outra.

Cadro 5.10: Proceso: Achar desprazamento.

<b>Identificador:</b>	2.3
<b>Nome:</b>	Procesar resultados.
<b>Fluxos entrantes:</b>	Desprazamento, Imaxe2, ángulo e escala.
<b>Fluxos saíntes:</b>	Resultado e Imaxe rexistrada.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso que xera o fluxo de datos en modo texto para amosar por pantalla e produce a imaxe rexistrada resultante do proceso.

Cadro 5.11: Proceso: Procesar resultados.

<b>Identificador:</b>	2.1.1
<b>Nome:</b>	Calcular FFT
<b>Fluxos entrantes:</b>	Parámetros, Imaxe1 reducida, Imaxe2 reducida.
<b>Fluxos saíntes:</b>	FFT Imaxe1 e FFT Imaxe2.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso que calcula a FFT das imaxes que ten como entrada.

Cadro 5.12: Proceso: Calcular FFT.

<b>Identificador:</b>	2.1.2
<b>Nome:</b>	Calcular FFTShift
<b>Fluxos entrantes:</b>	FFT Imaxe1 e FFT Imaxe2.
<b>Fluxos saíntes:</b>	FFTShift Imaxe1 e FFTShift Imaxe2.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso que reordena os puntos das imaxes de entrada en orden crecente de frecuencia.

Cadro 5.13: Proceso: Calcular FFTShift.

<b>Identificador:</b>	2.1.3
<b>Nome:</b>	Realizar Filtro pasa-alta
<b>Fluxos entrantes:</b>	FFTShift Imaxe1 e FFTShift Imaxe2.
<b>Fluxos saíntes:</b>	Imaxe1 filtrada e Imaxe2 filtrada.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso de aplicación dun filtro pasa-alta que como o seu nome indica permite pasar as frecuencias máis altas sen modificar e atenúa as frecuencias máis baixas.

Cadro 5.14: Proceso: Realizar Filtro pasa-alta.

<b>Identificador:</b>	2.1.4
<b>Nome:</b>	Calcular Log-Polar
<b>Fluxos entrantes:</b>	Imaxe1 filtrada e Imaxe2 filtrada.
<b>Fluxos saíntes:</b>	LogPolar Imaxe1 e LogPolar Imaxe2.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso de transformación dos datos de entrada do espazo cartesiano a datos no espazo log-polar.

Cadro 5.15: Proceso: Calcular Log-Polar.

<b>Identificador:</b>	2.1.5
<b>Nome:</b>	Calcular Correlación-cruzada
<b>Fluxos entrantes:</b>	LogPolar Imaxe1 e LogPolar Imaxe2.
<b>Fluxos saíntes:</b>	Matriz correlación cruzada.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso de calculo da correlación cruzada tal e como se explica no Capítulo 6 de Implementación.

Cadro 5.16: Proceso: Calcular correlación-cruzada.

<b>Identificador:</b>	2.1.6
<b>Nome:</b>	Ordenar valores ( <i>Quicksort</i> )
<b>Fluxos entrantes:</b>	Matriz correlación cruzada.
<b>Fluxos saíntes:</b>	Matriz correlación cruzada ordenada.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso de ordenación dos valores da matriz de entrada de menor a maior.

Cadro 5.17: Proceso: Ordenar valores (*Quicksort*).

<b>Identificador:</b>	2.1.7
<b>Nome:</b>	Calcular ángulo e escala
<b>Fluxos entrantes:</b>	Matriz correlación cruzada ordenada.
<b>Fluxos saíntes:</b>	Ángulo e escala.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso de achado do ángulo e da escala a partir dos datos de entrada.

Cadro 5.18: Proceso: Calcular ángulo e escala.

<b>Identificador:</b>	2.2.1
<b>Nome:</b>	Rotar e/ou Escalar imaxe
<b>Fluxos entrantes:</b>	Imaxe2 reducida, ángulo, escala e parámetros.
<b>Fluxos saíntes:</b>	Imaxe2 escalada e/ou rotada ángulo e Imaxe2 escalada e/ou rotada ángulo+180°.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso de escalado e/ou rotado da <i>Imaxe2 reducida</i> .

Cadro 5.19: Proceso: Rotar e/ou Escalar imaxe.

<b>Identificador:</b>	2.2.2
<b>Nome:</b>	Calcular Correlacións cruzadas
<b>Fluxos entrantes:</b>	Imaxe2 escalada e/ou rotada ángulo, Imaxe2 escalada e/ou rotada ángulo+180° e Imaxe1 reducida.
<b>Fluxos saíntes:</b>	Matriz correlación cruzada1 e matriz correlación cruzada2.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso onde se calcula a correlación cruzada da <i>Imaxe1 reducida</i> coa <i>Imaxe2 escalada e/ou rotada ángulo</i> e da <i>Imaxe1</i> coa <i>Imaxe2 escalada e/ou rotada ángulo+180°</i> .

Cadro 5.20: Proceso: Calcular Correlacións cruzadas.

<b>Identificador:</b>	2.2.3
<b>Nome:</b>	Buscar valor máximo
<b>Fluxos entrantes:</b>	Matriz correlación cruzada1 e matriz correlación cruzada2.
<b>Fluxos saíntes:</b>	Max1 e max2.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso que devolve os valores máximos das matrices de entrada.

Cadro 5.21: Proceso: Buscar valor máximo.

<b>Identificador:</b>	2.2.4
<b>Nome:</b>	Calcular desprazamento
<b>Fluxos entrantes:</b>	Max1 e max2.
<b>Fluxos saíntes:</b>	Desprazamento.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso que acha o desprazamento do cal difire unha imaxe da outra a partir dos datos de entrada.

Cadro 5.22: Proceso: Calcular desprazamento.

<b>Identificador:</b>	2.3.1
<b>Nome:</b>	Rotar, escalar e/ou desprazar imaxe hiperespectral
<b>Fluxos entrantes:</b>	Ángulo, escala, desprazamento e Imaxe2.
<b>Fluxos saíntes:</b>	Imaxe rexistrada.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso que rota, escala e/ou despraza a imaxe orixinal a rexistrar co factor de escala, ángulo de rotado e desprazamento obtido no proceso de rexistrado.

Cadro 5.23: Proceso: Rotar, escalar e/ou desprazar imaxe hiperespectral.

<b>Identificador:</b>	2.3.2
<b>Nome:</b>	Imprimir por pantalla
<b>Fluxos entrantes:</b>	Ángulo, escala e desprazamento.
<b>Fluxos saíntes:</b>	Resultado.
<b>Descrición do contido:</b>	Proceso que presenta os resultados do proceso de rexistrado das imaxes por monitor.

Cadro 5.24: Proceso: Imprimir por pantalla.

**Fluxos de datos**

<b>Nome:</b>	Imaxe rexistrada.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 0 → Almacén de datos (Ficheiros) Proceso 2 → Almacén de datos (Ficheiros) Proceso 2.3 → Almacén de datos (Ficheiros) Proceso 2.3.1 → Almacén de datos (Ficheiros)
<b>Descrición do contido:</b>	Imaxe resultante tras a realización do rexistrado.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Ficheiro RAW.

Cadro 5.25: Fluxo de datos: Imaxe rexistrada.

<b>Nome:</b>	Parámetros.
<b>Orixe/Destino:</b>	Entidade externa(Usuario) → Proceso 0 Entidade externa(Usuario) → Proceso 1 Entidade externa(Usuario) → Proceso 2 Entidade externa(Usuario) → Proceso 1.1 Entidade externa(Usuario) → Proceso 2.1 Entidade externa(Usuario) → Proceso 2.2 Entidade externa(Usuario) → Proceso 2.1.1 Entidade externa(Usuario) → Proceso 2.2.1
<b>Descrición do contido:</b>	Conxunto de datos textuais aportados polo usuario con fin de seleccionar diferentes opcións que permite escoller o sistema. Por exemplo, a versión de algoritmo a aplicar.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Modo texto.

Cadro 5.26: Fluxo de datos: Parámetros.

<b>Nome:</b>	Imaxes de entrada.
<b>Orixe/Destino:</b>	Almacén de datos (Ficheiros) → Proceso 0
<b>Descrición do contido:</b>	Imaxes de entrada=Imaxe1 + Imaxe2
<b>Comentarios adicionais:</b>	Ficheiros RAW.

Cadro 5.27: Fluxo de datos: Imaxes de entrada.

<b>Nome:</b>	Resultado.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 0 → Entidade externa (Monitor) Proceso 2 → Entidade externa (Monitor) Proceso 2.3 → Entidade externa (Monitor) Proceso 2.3.1 → Entidade externa (Monitor)
<b>Descrición do contido:</b>	Resultado do rexistrado: ángulo de rotación, factor de escala e desprazamento.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Modo texto.

Cadro 5.28: Fluxo de datos: Resultado.

<b>Nome:</b>	Imaxe1.
<b>Orixe/Destino:</b>	Almácen de datos (Ficheiros) → Proceso 1 Almácen de datos (Ficheiros) → Proceso 1.1
<b>Descrición do contido:</b>	Imaxe de referencia orixinal.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Ficheiro RAW.

Cadro 5.29: Fluxo de datos: Imaxe1.

<b>Nome:</b>	Imaxe2.
<b>Orixe/Destino:</b>	Almácen de datos (Ficheiros) → Proceso 1 Almácen de datos (Ficheiros) → Proceso 2 Almácen de datos (Ficheiros) → Proceso 1.1 Almácen de datos (Ficheiros) → Proceso 2.3 Almácen de datos (Ficheiros) → Proceso 2.3.1
<b>Descrición do contido:</b>	Imaxe a rexistrar orixinal.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Ficheiro RAW.

Cadro 5.30: Fluxo de datos: Imaxe2.

<b>Nome:</b>	Imaxe1 reducida.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 1 → Proceso 2 Proceso 1.2 → Proceso 2.1 Proceso 1.2 → Proceso 2.2 Proceso 2.1 → Proceso 2.1.1 Proceso 2.2 → Proceso 2.2.2
<b>Descrición do contido:</b>	Imaxe de referencia tras aplicarlle unha técnica de extracción de características que reduce a súa dimensionalidade.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.31: Fluxo de datos: Imaxe1 reducida.

<b>Nome:</b>	Imaxe2 reducida.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 1 → Proceso 2 Proceso 1.2 → Proceso 2.1 Proceso 1.2 → Proceso 2.2 Proceso 2.1 → Proceso 2.1.1 Proceso 2.2 → Proceso 2.2.1
<b>Descrición do contido:</b>	Imaxe a rexistrar tras aplicarlle unha técnica de extracción de características que reduce a súa dimensionalidade.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.32: Fluxo de datos: Imaxe2 reducida.

<b>Nome:</b>	Imaxe2 reducida.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 1 → Proceso 2 Proceso 1.2 → Proceso 2.1 Proceso 1.2 → Proceso 2.2 Proceso 2.1 → Proceso 2.1.1 Proceso 2.2 → Proceso 2.2.1
<b>Descrición do contido:</b>	Imaxe de referencia tras aplicarlle unha técnica de extracción de características que reduce a súa dimensionalidade.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.33: Fluxo de datos: Imaxe2 reducida.

<b>Nome:</b>	Imaxe1 transformada.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 1.1 → Proceso 1.2
<b>Descrición do contido:</b>	Imaxe de referencia orixinal almacenada no modelo de datos usado polo sistema.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.34: Fluxo de datos: Imaxe1 transformada.

<b>Nome:</b>	Imaxe2 transformada.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 1.1 → Proceso 1.2
<b>Descrición do contido:</b>	Imaxe a rexistrar orixinal almacenada no modelo de datos usado polo sistema.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.35: Fluxo de datos: Imaxe2 transformada.

<b>Nome:</b>	Ángulo.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.1 → Proceso 2.2 Proceso 2.1 → Proceso 2.3 Proceso 2.1.7 → Proceso 2.2.1 Proceso 2.1.7 → Proceso 2.3.1 Proceso 2.1.7 → Proceso 2.3.2
<b>Descrición do contido:</b>	Ángulo de rotación.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Número decimal.

Cadro 5.36: Fluxo de datos: Ángulo.

<b>Nome:</b>	Escala.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.1 → Proceso 2.2 Proceso 2.1 → Proceso 2.3 Proceso 2.1.7 → Proceso 2.2.1 Proceso 2.1.7 → Proceso 2.3.1 Proceso 2.1.7 → Proceso 2.3.2
<b>Descrición do contido:</b>	Factor de escala.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Número decimal.

Cadro 5.37: Fluxo de datos: Escala.

<b>Nome:</b>	Desprazamento.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.2 → Proceso 2.3 Proceso 2.2.4 → Proceso 2.3.1 Proceso 2.2.4 → Proceso 2.3.2
<b>Descrición do contido:</b>	Desprazamento dunha imaxe respecto doutra.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Dous números enteiros.

Cadro 5.38: Fluxo de datos: Desprazamento.

<b>Nome:</b>	FFT Imaxe1.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.1.1 → Proceso 2.1.2
<b>Descrición do contido:</b>	Resultado de realizar a Transformada Rápida de Fourier á Imaxe reducida.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.39: Fluxo de datos: FFT Imaxe1.

<b>Nome:</b>	FFT Imaxe2.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.1.1 → Proceso 2.1.2
<b>Descrición do contido:</b>	Resultado de realizar a Transformada Rápida de Fourier á Imaxe reducida.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.40: Fluxo de datos: FFT Imaxe2.

<b>Nome:</b>	FFTShift Imaxe1.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.1.2 → Proceso 2.1.3
<b>Descrición do contido:</b>	Resultado de centrar a Transformada Rápida de Fourier da Imaxe reducida.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.41: Fluxo de datos: FFTShift Imaxe1.

<b>Nome:</b>	FFTShift Imaxe2.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.1.2 → Proceso 2.1.3
<b>Descrición do contido:</b>	Resultado de centrar a Transformada Rápida de Fourier da Imaxe reducida.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.42: Fluxo de datos: FFTShift Imaxe2.

<b>Nome:</b>	Imaxe1 Filtrada.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.1.3 → Proceso 2.1.4
<b>Descrición do contido:</b>	Resultado de realizar o filtrado pasa-alta de frecuencias á FFTShift da imaxe.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.43: Fluxo de datos: Imaxe1 Filtrada.

<b>Nome:</b>	Imaxe2 Filtrada.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.1.3 → Proceso 2.1.4
<b>Descrición do contido:</b>	Resultado de realizar o filtrado pasa-alta de frecuencias á FFTShift da imaxe.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.44: Fluxo de datos: Imaxe2 Filtrada.

<b>Nome:</b>	LogPolar Imaxe1.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.1.4 → Proceso 2.1.5
<b>Descrición do contido:</b>	Resultado de calcular a LogPolar dos valores da imaxe despois do filtrado.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.45: Fluxo de datos: LogPolar Imaxe1.

<b>Nome:</b>	LogPolar Imaxe2.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.1.4 → Proceso 2.1.5
<b>Descrición do contido:</b>	Resultado de calcular a LogPolar dos valores da imaxe despois do filtrado.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.46: Fluxo de datos: LogPolar Imaxe2.

<b>Nome:</b>	Matriz correlación cruzada.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.1.5 → Proceso 2.1.6
<b>Descrición do contido:</b>	Matriz correlación cruzada=CorrelaciónCruzada(LogPolar Imaxe1,LogPolar Imaxe2)
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.47: Fluxo de datos: Matriz correlación cruzada.

<b>Nome:</b>	Matriz correlación cruzada ordenada.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.1.6 → Proceso 2.1.7
<b>Descrición do contido:</b>	Resultado de aplicación dun método de ordenación a Matriz correlación cruzada. Os valores quedan ordenados de maior a menor.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.48: Fluxo de datos: Matriz correlación cruzada ordenada.

<b>Nome:</b>	Imaxe2 escalada e/ou rotada ángulo.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.2.1 → Proceso 2.2.2
<b>Descrición do contido:</b>	Matriz resultante de escalar e/ou rotar X ángulo a Imaxe2 reducida.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.49: Fluxo de datos: Imaxe2 escalada e/ou rotada ángulo.

<b>Nome:</b>	Imaxe2 escalada e/ou rotada ángulo+180°.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.2.1 → Proceso 2.2.2
<b>Descrición do contido:</b>	Matriz resultante de escalar e/ou rotar X+180° ángulo a Imaxe2 reducida.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.50: Fluxo de datos: Imaxe2 escalada e/ou rotada ángulo+180°.

<b>Nome:</b>	Matriz correlación cruzada 1.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.2.2 → Proceso 2.2.3
<b>Descrición do contido:</b>	Matriz_correlación_cruzada_1 = CorrelaciónCruzada(Imaxe1_reducida, Imaxe2_escalada_e/ou_rotada_ángulo)
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.51: Fluxo de datos: Matriz correlación cruzada 1.

<b>Nome:</b>	Matriz correlación cruzada 2.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.2.2 → Proceso 2.2.3
<b>Descrición do contido:</b>	Matriz_correlación_cruzada_2 = CorrelaciónCruzada(Imaxe1_reducida, Imaxe2_escalada_e/ou_rotada_ángulo+180°)
<b>Comentarios adicionais:</b>	Matriz de números reais.

Cadro 5.52: Fluxo de datos: Matriz correlación cruzada 2.

<b>Nome:</b>	Max1.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.2.3 → Proceso 2.2.4
<b>Descrición do contido:</b>	Valor máximo da Matriz correlación cruzada 1.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Número decimal.

Cadro 5.53: Fluxo de datos: Max1.

<b>Nome:</b>	Max2.
<b>Orixe/Destino:</b>	Proceso 2.2.3 → Proceso 2.2.4
<b>Descrición do contido:</b>	Valor máximo da Matriz correlación cruzada 2.
<b>Comentarios adicionais:</b>	Número decimal.

Cadro 5.54: Fluxo de datos: Max2.

## 5.4. Modelo de datos

Debido ás características do proxecto e que foi desenvolvido en linguaxe C o modelo de datos empregado para o desenvolvemento dos algoritmos de rexistrado non é moi complexo.

As imaxes lidas dende ficheiro son representadas mediante unha matriz (*array* en inglés) de números enteiros almacenada en memoria como a que se amosa a continuación:

```
int *datos;
```

Unha vez se comece a operar coas imaxes estas son transformadas a un tipo propio chamado **complexo** que é unha estrutura conformada por dúas matrices de tipo *double*, onde unha delas representa a parte real e a outra a parte imaxinaria dos números reais que forman a imaxe, e por dous números enteiros que especifican o tamaño da imaxe.

```
typedef struct complexo {  
    double *re , *im ;  
    int NH,NV ;  
} complexo ;
```

Ademais para facilitar o paso dos resultados do proceso de rexistrado na interface gráfica creouse outro novo tipo de datos chamado **RESULTADO** que contén os valores achados para o factor de escala, o ángulo de rotación e os desprazamentos.

```
typedef struct RESULTADO {  
    double angulo , escala ;  
    int desprX , desprY ;  
} RESULTADO ;
```

# Capítulo 6

## Implementación

Neste capítulo detállase como será levada a cabo a implementación dos algoritmos desenvolvidos así como as técnicas de preprocesado empregadas para reducir a dimensionalidade das imaxes hiperespectrais antes de servir como *entradas* do algoritmo.

Presentaranse os diferentes métodos dunha maneira máis teórica e dunha maneira máis sinxela para a súa mellor comprensión.

### 6.1. Redución da dimensionalidade da imaxe hiperespectral

Debido a grande cantidade de datos que contén unha imaxe hiperespectral a súa aplicación a unha técnica de rexistrado non é inmediata. Unha imaxe hiperespectral contén unha grande cantidade de datos en cada píxel. Para procesar toda esta información dunha maneira eficiente, para neste caso facer o rexistrado, temos que extraer mediante algún proceso matemático a información máis relevante da imaxe. Na práctica isto produce imaxes cunha menor dimensionalidade, é dicir, con un número menor de bandas respecto da imaxe orixinal e incluso podendo chegar a xerar unha única banda (pero coa información máis relevante). Esta técnica recibe o nome de extracción de características.

Nesta sección explícanse as técnicas máis avanzadas de extracción de características avaliadas.

#### 6.1.1. Gradientes

O obxectivo principal das técnicas que consisten en aplicar gradientes, en procesamento de imaxes no dominio espacial (o termo espacial refírese a manipular

directamente os píxeles da imaxe), é o de obter unha imaxe máis adecuada que a imaxe orixinal para unha aplicación específica. É dicir, melloralala para o seu uso concreto.

Tradicionalmente o gradiente foi empregado para resaltar os detalles dunha imaxe ou para mellorar os píxeles máis borrosos causados debido ao sensor co que foron tomadas as imaxes ou por un efecto realizado a propósito. Noutras palabras, mellorar o enfoque da imaxe. A idea aplicando este método en imaxes hiperspectrais é obter unha única banda onde se resaltarán as transicións entre píxeles segundo os valores que teñan nas diferentes bandas.

### Gradiente vectorial

Para unha función  $f(x, y)$ , o gradiente de  $f$  nas coordenadas  $(x, y)$  ven definido polo seguinte vector:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}. \quad (6.1)$$

Pero realmente ao que nos referimos cando dicimos *gradiente* é a magnitude do vector (Ecuación 6.1):

$$\begin{aligned} \nabla f &= \text{mag}(\nabla f) = [G_x^2 + G_y^2]^{\frac{1}{2}} \\ &= \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (6.2)$$

Aplicar a Ecuación (6.2) a toda unha imaxe require un custo computacional moi elevado e máis se a imaxe é multidimensional. É por isto polo que habitualmente se empregan aproximacións da magnitude do gradiente, como é o caso deste traballo.

### Gradiente RCMG

Para as imaxes hiperspectrais non se adoita aplicar un gradiente común como o explicado na anterior sección, senón que se emprega un gradiente *morfolóxico*.

O operador morfolóxico básico para imaxes en gris ben definido pola Ecuación (6.3):

$$\nabla(f) = \delta_g(f) - \varepsilon_g(f) , \quad (6.3)$$

onde  $\delta_g$  e  $\varepsilon_g$  son os operadores morfolóxicos de dilatación e erosión e,  $g$  o elemento que define a veciñanza dun píxel da imaxe  $f$  [26]. Alternativamente esta ecuación pode ser expresada como a maior diferenza de intensidade entre calquera dous píxeles do veciñanza (Ecuación 6.4):

$$\begin{aligned}\nabla(f) &= \max_{x \in g} \{f(x)\} - \min_{y \in g} \{f(y)\} \\ &= \max(|f(x) - f(y)|) \quad \forall x, y \in g .\end{aligned}\tag{6.4}$$

Esta ecuación pode ser facilmente extensible a imaxes en cor xa que basicamente teriamos un vector de píxeles con tres compoñentes: a vermella, a verde e a azul, que son as diferentes canles de color [27]. Supoñendo que  $\mathbf{x}$  é un vector de píxeles dunha imaxe en cor e  $\chi = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n]$  é un conxunto de  $n$  vectores de píxeles da veciñanza de  $\mathbf{x}$ , e que dito conxunto contén á propia  $\mathbf{x}$ . Entón o Color Morphological Gradient (CMG),  $\nabla(\mathbf{f})$ , usando a distancia Euclidea defínese como:

$$\nabla(f) = \max_{i, j \in \chi} \{ \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|_2 \} ,\tag{6.5}$$

cuxa resposta é a máxima das distancias entre todos os pares de vectores no conxunto  $\chi$ . Sen embargo o CMG vese afectado notablemente polo ruído podendo producir bordes que non son representativos no gradiente da imaxe. Por esta razón o Robust Color Morphological Gradient (RCMG) é proposto en [27] baseado no rexeitamento daqueles pares de píxeles pouco representativos dentro do conxunto  $\chi$ . Estes son os pares de píxeles que están máis alonxados. O RCMG,  $\nabla(\mathbf{f})_{Robust}$ , defínese na Ecuación (6.6):

$$\nabla(f)_{Robust} = \max_{i, j \in \chi - R_s} \{ \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|_2 \} .\tag{6.6}$$

Para aplicar o RCMG a unha imaxe hiperespectral refírese a un vector de píxeles a un píxel da imaxe hiperespectral con todas as  $n$ -bandas como compoñentes dun vector  $n$ -dimensional. Por iso aplicando o RCMG a este tipo de imaxes conséguese reducir a súa dimensionalidade a unha soa banda conseguindo así o noso propósito e ademais obtendo un gradiente máis insensible ao ruído que o gradiente vectorial común.

### 6.1.2. PCA

Principal Component Analysis (PCA), ou en galego Análise de Compoñentes Principais, é unha técnica estatística empregada xeralmente para reducir a dimensionalidade dun conxunto de datos polo que é aplicable a unha imaxe hiperespectral xa que está non deixa de ser un grande conxunto de datos repartidos nas múltiples bandas que a conforman.

A análise de compoñentes principais en imaxes hiperespectrais está baseada na eliminación de redundancia de datos mediante a análise da alta correlación que hai entre as súas bandas xa que frecuentemente se transmite a mesma información sobre os mesmos obxectos. PCA condensa toda a información que tiñamos en  $N$  bandas da imaxe orixinal nun reducido número de novas bandas chamadas compoñentes principais ou autovectores. Polo tanto reducimos o número de compoñentes por píxel.

Só as primeiras compoñentes PCA son as que conteñen a maior parte de información útil. Deste xeito o primeiro autovector conterá a maior porcentaxe de datos da imaxe orixinal, o segundo conterá menor porcentaxe que o primeiro, e así sucesivamente.

Para calcular as PCA imos seguir estes pasos xerais [28]:

- Buscar o vector medio no espazo- $\mathbf{x}$ , o cal é o espazo formado por todos os vectores dos píxeles (vector dun píxel definido na ecuación (6.7)) que conforman a imaxe.
- Calcular a matriz de covarianza no espazo- $\mathbf{x}$ .
- Calcular os autovalores e os seus correspondentes autovectores.
- Formar as compoñentes no espazo definido polos autovectores.

Se temos unha imaxe hiperespectral con  $N$  bandas, un vector dun píxel da imaxe exprésase do seguinte xeito [29]:

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T \quad (6.7)$$

onde  $x_1, x_2, \dots, x_N$  son os valores do píxel en cada unha das  $M$  bandas. Isto pode entenderse mellor se observamos a Figura 6.1. Se a imaxe ten unha resolución de  $K = M \cdot N$  onde  $M$  son as filas e  $N$  as columnas, teremos un vector do mesmo tipo que o anterior para cada píxel da imaxe facendo un total de  $M \cdot N$  vectores.

$$m_{\mathbf{x}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}_k \quad (6.8)$$

A matriz de covarianza de tamaño  $N \cdot N$  calcúlase da seguinte maneira:

$$C_{\mathbf{x}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^T - m_{\mathbf{x}} m_{\mathbf{x}}^T. \quad (6.9)$$

A transformación PCA está baseada na descomposición de autovalores da matriz de covarianza,

$$C_{\mathbf{x}} = ADA^T \quad (6.10)$$

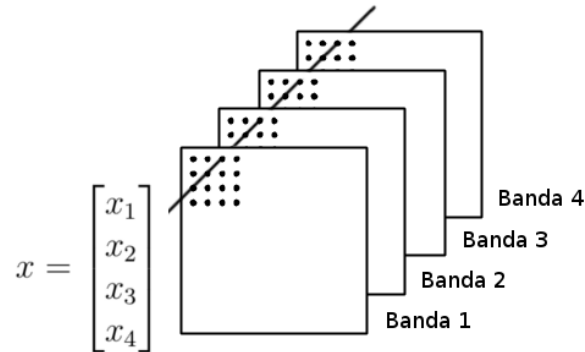


Figura 6.1: Un vector dun pixel dunha imaxe hiperespectral de 4 bandas (adaptación de [29])

onde  $D = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$  é a matriz diagonal composta polos autovalores  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$  de  $C_{\mathbf{x}}$  e  $A$  é a matriz ortonormal composta polos autovectores de dimensión  $N$ ,  $a_k (k = 1, 2, \dots, N)$  de  $C_{\mathbf{x}}$ , é dicir:

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_N). \quad (6.11)$$

Entón a transformación lineal ven definida da seguinte maneira:

$$\mathbf{y}_i = A^T \mathbf{x}_i, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (6.12)$$

onde  $\mathbf{y}_i$  é un vector que representa a un píxel da PCA, e conxuntamente todos os vectores  $\mathbf{y}_i$  conforman as bandas PCA, é dicir as bandas transformadas a partir das da imaxe orixinal.

Collendo os autovalores e autovectores en orde descendente,  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$ , as primeiras  $Q$  filas da matriz  $A^T$  son os  $Q$  primeiros autovectores, sabendo que  $Q \leq N$  e usualmente  $Q \ll N$ . Estes autovectores son os que se empregan para calcular unha aproximación da imaxe orixinal da seguinte maneira:

$$\mathbf{Y}_i = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_Q \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1Q} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2Q} & \dots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{Q1} & a_{Q2} & \dots & a_{QQ} & \dots & a_{QN} \end{bmatrix}_i \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_Q \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix}_i, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (6.13)$$

onde cada vector de píxeles  $\mathbf{Y}_i$ , correspondente ao píxel  $i$  da imaxe  $Y$ , ten compoñentes nas  $Q$  novas bandas.

Como xa dixemos as primeiras bandas PCA conteñen a maior porcentaxe de información, e as derradeiras adoitan caracterizarse por un escaso contido de

datos relevantes contendo maiormente o ruído presenta na imaxe orixinal. Polo que tamén se pode dicir que este método reduce o ruído que pode ter a imaxe orixinal [30].

## 6.2. Algoritmo baseado na FFT

Existen diferentes métodos de rexistrado de imaxes os cales poderíamos dividir basicamente en algoritmos que usan os valores dos píxeles da imaxe directamente, algoritmos que empregan características de baixo nivel como poden ser bordes e esquinas e algoritmos que usan características de alto nivel como a identificación de obxectos ou relacións entre características e algoritmos se resolven no dominio da frecuencia.

O algoritmo implementado neste traballo é do último tipo, pois emprega a FFT para comparar dúas imaxes onde unha está escalada, rotada e/ou desprazada respecto da outra. A FFT é a abreviatura de Transformada Rápida de Fourier o cal é un eficiente algoritmo que permite calcular a Transformada de Fourier Discreta (DFT). O aliñamento de imaxes baseado na Transformada Rápida de Fourier foi proposto nun artigo de investigación [6] en 1994. Dende aquela téñense publicado numerosas investigacións con novas propostas de mellora [31][32].

Este tipo de procedementos baseados na FFT destacan fronte a outros en que son máis robustos fronte ó ruído e ás variacións lumínicas. Ademais teñen unha baixa complexidade computacional e o tempo de execución é fixo non dependendo das imaxes a rexistrar. Isto non ocorre coa maioría dos métodos de rexistrado espacial os cales adoitan ter un alto custo computacional e onde o tempo de execución de rexistrado de dúas imaxes depende delas mesmas sendo polo tanto imposible de calcular.

O algoritmo ten como datos de entrada dúas imaxes: a imaxe de referencia e a imaxe a rexistrar. Queremos calcular de canto é a rotación, escalado e/ou desprazamento da imaxe a rexistrar respecto da imaxe de referencia para así poder comparalas.

As dúas técnicas máis importantes empregadas neste algoritmo son a correlación cruzada e a transformación Log-Polar. A continuación vaise a proceder a describir estas en detalle, antes de entrar a explicar o algoritmo, para unha maior comprensión.

### 6.2.1. Correlación cruzada

A correlación cruzada permítenos achar o desprazamento entre dúas dúas imaxes con unha grande precisión e robustez.

Supoñamos entón unha imaxe  $f_1(x, y)$  e outra imaxe  $f_2(x, y)$  a cal é froito de aplicarlle un desprazamento  $(x_0, y_0)$  a  $f_1$ ,

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0). \quad (6.14)$$

Aplicándolle a Transformada Rápida de Fourier a relación queda da seguinte maneira,

$$F_2(u, v) = e^{-j2\pi(ux_0+vy_0)} \cdot F_1(u, v). \quad (6.15)$$

Entón a correlación cruzada destas dúas imaxes coa FFT ben definida como

$$\frac{F_1(u, v) F_2^*(u, v)}{|F_1(u, v) F_2^*(u, v)|} = e^{j2\pi(ux_0+vy_0)} \quad (6.16)$$

onde  $F_2^*$  é o conxugado complexo de  $F_2$ . O teorema de desprazamento da FFT garántenos que o desprazamento existente entre as dúas imaxes é o mesmo que a diferenza de fase da correlación cruzada. Aplicándolle agora a transformada inversa de Fourier, quedanos unha matriz onde case todos os valores son 0, podemos obter o desprazamento  $(x_0, y_0)$  buscando a posición onde se atopa o pico máximo (valor máximo entre todos os valores resultantes) [32].

Supoñamos agora unha imaxe  $f_1(x, y)$  e outra imaxe  $f_2(x, y)$  a cal é  $f_1$  rotada cun ángulo  $\theta_0$  e cun desprazamento  $(x_0, y_0)$ , entón

$$f_2(x, y) = f_1(x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0 - x_0, -x \sin \theta_0 + y \cos \theta_0 - y_0). \quad (6.17)$$

De acordo coa propiedade de translación e rotación da Transformada Rápida de Fourier (FFT), as transformadas de  $f_1(x, y)$  e  $f_2(x, y)$  son:

$$F_2(u, v) = e^{-j2\pi(ux_0+vy_0)} \cdot F_1(u \cos \theta_0 + v \sin \theta_0, -u \sin \theta_0 + v \cos \theta_0). \quad (6.18)$$

Entón podemos calcular as magnitudes de  $F_1$  e  $F_2$  da seguinte maneira:

$$M_2(u, v) = M_1(u \cos \theta_0 + v \sin \theta_0, -u \sin \theta_0 + v \cos \theta_0). \quad (6.19)$$

Como vemos a magnitude de  $F_1$  e  $F_2$  son a mesma, tan só se diferencian en que unha delas é a copia rotada da outra. Este ángulo de rotación pode ser achado aplicando o método correlación explicado máis atrás (Ecuación 6.16).

Demos un paso máis. Supoñamos agora unha imaxe  $f_1(x, y)$  e outra imaxe  $f_2(x, y)$  a cal é  $f_1$  rotada cun ángulo  $\theta_0$ , desprazada  $(\Delta_x, \Delta_y)$  e cunha escala de  $s$  entón

$$f_2(x, y) = f_1(s(x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0) + \Delta_x, s(-x \sin \theta_0 + y \cos \theta_0) + \Delta_y). \quad (6.20)$$

A continuación aplicámoslle a Transformada de Fourier a ambas imaxes [32] e substituímos  $\omega_x$  e  $\omega_y$  coas seguintes ecuacións:

$$\begin{aligned} \omega_x &= r \cos \theta \\ \omega_y &= r \sin \theta \end{aligned} \quad (6.21)$$

entón obtemos,

$$\hat{F}_2 = e^{j(\omega_x \Delta_x + \omega_y \Delta_y)} s^{-2} \hat{F}_1(s^{-1}r, \theta + \theta_0). \quad (6.22)$$

Supoñendo entón que as magnitudes de  $F_1$  e  $F_2$  son  $M_1$  e  $M_2$ , entón temos que

$$M_2(r, \theta) = s^{-2} M_1(s^{-1}r, \theta + \theta_0). \quad (6.23)$$

Se estas magnitudes as representamos en coordenadas log-polar obtemos,

$$M_2(\log r, \theta) = s^{-2} M_1(\log r - \log s, \theta + \theta_0). \quad (6.24)$$

Aplicándolle a correlación a este  $M_1$  e  $M_2$  podemos achar o ángulo de rotación  $\theta_0$  e o factor de escala  $s$ .

### 6.2.2. Log-polar

Por outra banda, como xa se dixo, unha das técnicas máis importantes no algoritmo é a transformación a coordenadas Log-Polar. Como acabamos de ver, esta emprégase para recuperar o ángulo de rotación e o factor de escala debido a que un escalado e unha rotación no dominio cartesiano correspóndese puramente con un desprazamento no dominio log-polar.

Unha coordenada polar representa un punto dun plano mediante unha distancia  $\rho$  e un ángulo  $\theta$ . Unha coordenada polar podemos transformala a coordenadas log-polar realizándolle o logaritmo á distancia radial  $\rho$ . Supoñamos entón unha coordenada polar  $(\rho, \theta)$ , a coordenada log-polar equivalente sería  $(\log \rho, \theta)$ .

Polo tanto aplicarlle a transformada log-polar a unha imaxe consiste en mapear os puntos do plano cartesiano  $(x, y)$  aos puntos no plano log-polar  $(\log \rho, \theta)$ .

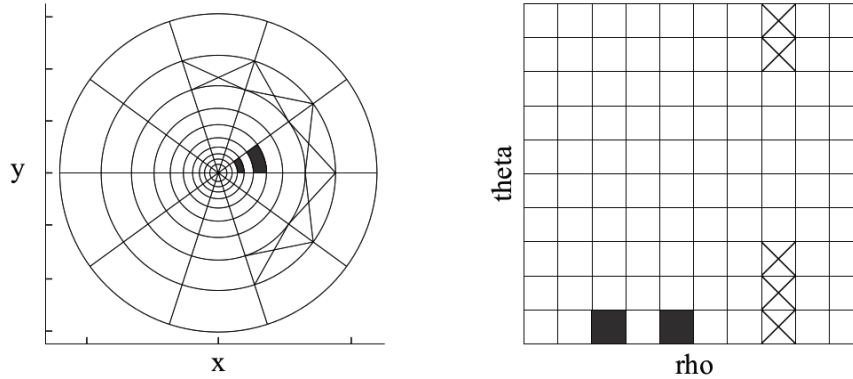


Figura 6.2: Representación gráfica dunha aproximación do espazo cartesiano (esquerda) ao espazo polar (dereita) [31].

Considerando unha imaxe no dominio cartesiano, onde  $\rho$  é a distancia radial dende o centro da imaxe  $(x_c, y_c)$  e  $\theta$  é o ángulo, calquera punto  $(x, y)$  pode ser representado nas coordenadas polares do seguinte xeito:

$$(\rho, \theta) = \left( \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}, \tan^{-1} \frac{(y - y_c)}{(x - x_c)} \right). \quad (6.25)$$

Entón as liñas radiais do dominio cartesiano (radios da circunferencia) son as que se mapean en liñas horizontais no dominio polar, como podemos ver na Figura 6.2.

Os cadrados negros son píxeles que teñen un ángulo constante respecto do centro. Os cadrados cunha xe son píxeles que manteñen unha distancia radial constante. Con esta figura podemos ver claramente que a rotación dunha imaxe produciría un desprazamento dos píxeles no espazo polar, como xa se dixo. Se se producira unha rotación os cadrados negros desprazaríanse sobre o eixe theta ( $\theta$ ), é dicir, cambiarían de fila.

Se se produce un escalado sobre a imaxe pasa o mesmo, isto é, produciríase un desprazamento no espazo polar. En coordenadas log-polar, o logaritmo do eixe radial é  $(\rho, \theta) = (\log(\rho), \theta)$ . Se a imaxe se escala cun factor  $s$ , entón as coordenadas no dominio cartesiano pasan a ser  $(s \cdot x, s \cdot y)$ . Estas coordenadas no dominio log-polar introducindo logaritmos quedaría da seguinte maneira,

$$(\log s \cdot x, \log s \cdot y) = ((\log s + \log x), (\log s + \log y)). \quad (6.26)$$

Queda demostrado entón que o escalado da imaxe produce tamén un desprazamento no dominio log-polar.

Por outra banda, se a imaxe a desprazamos  $(\Delta_x, \Delta_y)$ , as coordenadas log-polar serían as seguintes:

$$\begin{aligned}\rho' &= \log \sqrt{(e^\rho \cos \theta - \Delta_x)^2 + (e^\rho \sin \theta - \Delta_y)^2} \\ \theta' &= \tan^{-1} \frac{(e^\rho \sin \theta - \Delta_y)}{(e^\rho \cos \theta - \Delta_x)}.\end{aligned}\tag{6.27}$$

De acordo con esta ecuación realizar un desprazamento na imaxe produce modificacións no mapeo das coordenadas log-polar polo que a imaxe log-polar non serve para achar o desprazamento. Para superar esta limitación o que faremos será aplicar a correlación cruzada sobre as imaxes a rexistrar unha vez achados a rotación e o escalado. Isto explícase na seguinte sección.

### 6.2.3. Algoritmo final baseado na FFT

Nesta sección, unha vez xa exposto e explicado teoricamente as dúas técnicas centrais que conforman este algoritmo, vaise a proceder a explicar o algoritmo baseado na Transformada Rápida de Fourier (FFT) [32].

Inicialmente lense as dúas imaxes, a de referencia e a que queremos rexistrar, dende ficheiros de tipo RAW.

A continuación aplícaselle a ambas imaxes unha das técnicas de extracción de características expostas anteriormente co fin de como di o propio nome quedarnos cos datos máis relevantes e reducir a dimensionalidade a unha banda. Estas técnicas son: PCA, gradiente RCMG e o gradiente normal as cales se poden empregar de forma directa, de forma combinada ou algunha outra froito da combinación con unha media ou froito de restrinxir o número de bandas empregadas. As técnicas empregadas na implementación deste proxecto son as seguintes:

- Aplicar o algoritmo a unha ou varias (de forma individual) bandas PCA.
- Gradiente RCMG sobre as imaxes orixinais.
- Gradiente RCMG sobre unha ou varias bandas PCA.
- Gradiente vectorial sobre as imaxes orixinais.
- Gradiente vectorial sobre unha ou varias bandas PCA.
- Media de unha ou varias bandas PCA.
- Media de todas as bandas PCA.

Unha vez reducida a dimensionalidade, aplícaselle as dúas imaxes resultantes un filtro pasa-alta que como o seu nome indica permite pasar as frecuencias máis altas sen modificar e atenúa as frecuencias máis baixas. Isto permítenos eliminar posibles rúidos da imaxe. O esquema do filtrado é o seguinte:

- Realizar a Transformada Rápida de Fourier (FFT).
- Centrar a FFT (*fftshift*).
- Multiplicar pola función do filtro pasa-alta.
- Descentrar a FFT (*ifftshift*).
- Realizar a Transformada Inversa de Fourier (IFFT).

Recibe o nome de *fftshift* a reordenación dos puntos da matriz en orden crecente de frecuencia. É dicir, consiste en desprazar a compoñente de frecuencia cero ao centro. Deste xeito as frecuencias máis altas quedan nos bordes e as baixas quedan no centro. A *ifftshift* é o proceso inverso, noutras palabras intercambia o primeiro cuadrante co terceiro e o segundo cuadrante co cuarto cando se lle aplica a matrices.

A función de filtro empregada é a seguinte,

$$H(u, v) = (1, 0 - X(u, v)) \cdot (2, 0 - X(u, v)) \quad (6.28)$$

onde

$$X(u, v) = [\cos \pi u \cdot \cos \pi v], -0,5 \leq u \text{ e } v \leq 0,5 . \quad (6.29)$$

A continuación do derradeiro paso (Realizar a Transformada Inversa de Fourier (IFFT)) calcularíase a FFT, mais neste caso simplifícase coa *ifftshift* e a IFFT do filtrado pasa-alta. Noutras palabras, temos que realizar menos pasos grazas a esta simplificación, quedando entón os pasos anteriores reducidos a estes:

- Realizar a Transformada Rápida de Fourier (FFT).
- Centrar a FFT (*fftshift*).
- Multiplicar pola función do filtro pasa-alta.

Chegados ata este punto teremos dúas matrices cos valores das imaxes no dominio da frecuencia filtrados e centrados. Entón o algoritmo ata este intre quedaría da seguinte maneira:

1. Cargar a imaxe de referencia e a imaxe a rexistrar.
2. Aplicar técnica de extracción de características a ambas imaxes.
3. Realizar a FFT a ambas imaxes.
4. Centrar a FFT (*fftshift*) en ambas imaxes.

## 5. Multiplicar pola función do filtro en ambas imaxes.

De seguido transformamos as dúas matrices cartesianas a matrices no espazo log-polar. Para iso definimos unha nova matriz do tamaño da escala elixida para a log-polar, tipicamente é  $N/2$  sendo  $N \cdot N$  o tamaño da imaxe orixinal. Buscamos o punto central da imaxe que chamaremos  $(centro_x, centro_y)$ . A continuación imos recorrendo a nova matriz, e por canda punto imos colocando o valor que lle corresponde despois de mapear a coordenada polar á coordenada cartesiana. Interpolamos segundo a opción escollida pois este proxecto implementa a interpolación por proximidade, bilineal e bicúbica. Para realizar o mapeo, por cada fila que recorremos da nova matriz calculamos o eixo  $\rho$  correspondente a esa fila, en outras palabras, calculamos a liña radial na que estamos e que se mapea como unha fila na matriz (ver Figura 6.2). Por cada columna definimos o  $\theta$  correspondente o cal está entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$  dependendo do tamaño de resolución da log-polar. Para calcular  $\theta$  basta con facer  $2\pi/angle$ ; onde  $angle$  é o número de columnas da matriz log-polar.

Unha vez sabido isto, obtemos os puntos cartesianos correspondentes a esas coordenadas log-polar da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} x &= \rho \cdot \cos(\theta) + centro_x - 1 \\ y &= \rho \cdot \sin(\theta) + centro_y - 1. \end{aligned} \tag{6.30}$$

Logo realizamos a correlación cruzada coas dúas matrices da transformación log-polar segundo a Ecuación (6.16). Esta basicamente divídese nos seguintes pasos:

- Realizar a FFT.
- Realizar a correlación cruzada. Recorremos unha nova matriz do mesmo tamaño que as dúas resultantes da log-polar (chamémoslle  $X$  e  $Y$ ) e en cada posición desta nova matriz calculamos  $\frac{X(x,y) Y^*(x,y)}{|X(x,y) Y(x,y)|}$ .
- Realizar a Transformada Inversa de Fourier (IFFT).

Na matriz resultante de computar a correlación cruzada ordenamos os seus valores de menor a maior para así poder iterar entre os diferentes picos máximos. Para isto decidiuse empregar o Método de Ordenamento Rápido (*quicksort*), baseado na técnica divide e vencerás e que é actualmente un dos métodos máis eficientes e rápidos de ordenación interna. O funcionamento é sinxelo:

- Escollemos un elemento da lista a ordenar que lle chamaremos pivote.
- Recolocamos os elementos da lista a cada lado do pivote de xeito que os menores queden a súa esquerda e os maiores a súa dereita.

- A lista queda dividida en dúas sublistas, a da esquerda cos elementos menores que o pivote e a da dereita cos maiores.
- Repetimos o proceso para cada unha das sublistas ata que esta conteña máis de un elemento.

A complexidade media de *quicksort* para unha ordenación de  $n$  elementos é de  $O(n \log n)$ , isto depende do pivote escollido. Unha vez ordenada a matriz resultante da correlación escollemos o pico máximo e baseándonos nas coordenadas da súa posición orixinal antes da ordenación achamos a escala e a rotación. Sendo estas coordenadas  $(i, j)$  o factor de escalado é achado a partir da posición  $i$  e o ángulo de rotación proporcióno a posición  $j$ .

Coa escala e a rotación atopados pasamos a achar o desprazamento. Como xa se dixo e demostrou na Ecuación (6.27) este non pode ser calculado a partir da log-polar. Entón, escalamos imaxe a rexistrar de acordo co factor de escala obtido e rotámola co ángulo de rotación atopado e co ángulo+180°. Deste xeito poderemos discernir se o rotado se trata de 0-180° ou de 180°-360°.

A continuación volvemos realizar a correlación cruzada. Unha primeira correlación coa imaxe de referencia e a imaxe a rexistrar escalada e rotada co ángulo, e unha segunda coa imaxe de referencia tamén e a imaxe a rexistrar escalada e rotada co ángulo+180°. De seguido buscamos os picos máximos de ambas matrices resultantes e quedámonos co maior dos dous. O pico da imaxe escollida, ademais do desprazamento, diranos se a rotación é de ángulo+180° ou do ángulo. O desprazamento obtense das coordenadas do pico máximo.

Calculado o desprazamento, aplícaselle a imaxe rotada e/ou escalada escollida obtendo así a imaxe rexistrada.

En resumidas contas, o algoritmo é o seguinte:

1. Cargar a imaxe de referencia e a imaxe a rexistrar.
2. Aplicar técnica de extracción de características a ambas imaxes.
3. Realizar a FFT a ambas imaxes.
4. Centrar a FFT (*fftshift*) en ambas imaxes.
5. Multiplicar pola función do filtro en ambas imaxes.
6. Realizar a transformada Log-Polar en ambas imaxes.
7. Realizar a correlación cruzada (Enumeración 6.2.3) coas matrices resultantes da transformada Log-Polar.

8. Ordenar de menor a maior (ou de maior a menor) os valores da matriz resultante da correlación.
9. Escollemos o pico máximo (ou picos posteriores a este se se decide analizar varios picos) e achamos o ángulo de rotación e o factor de escalado a partir das súas coordenadas.
10. Escalamos e/ou rotamos a imaxe a rexistrar dúas veces: coa escala obtida e co ángulo obtido e coa escala obtida e o ángulo+180°.
11. Realizamos dúas correlacións cruzadas con cada matriz do paso anterior e coa imaxe de referencia orixinal.
12. Buscamos o pico máximo das dúas matrices do punto anterior, quedándonos co maior dos dous que será o que coas súas coordenadas obteñamos o desprazamento e nos permita discernir de que ángulo se trata(ángulo ou ángulo+180°).
13. Rotamos, escalados e desprazamos a imaxe a rexistrar cos datos achados mediante o algoritmo.

Cabe aclarar que o algoritmo pode contar de varias iteracións do punto 9 ao 12 dependendo do número de picos que queiramos avaliar. En determinados casos pódese dar que o pico máximo non é o correcto que nos proporcionará a rotación e o escalado acertado, podendo ser este un pico posterior.

### 6.3. Algoritmo gradientes

Co fin de mellorar a precisión e a robustez do anterior algoritmo propónse realizar o rexistrado sobre un gradiente [33] en vez de traballar directamente coas imaxes de entrada. Ao traballar sobre imaxes cos bordes remarcados (froito do gradiente) obtense unha transformada Log-Polar máis robusta e precisa evitando os problemas de ruído, erros de interpolación, *aliasing* e efectos de borde tan comúns nas imaxes. A raíz disto tamén aumenta a exactitude do cálculo con imaxes reais que puideron sufrir outro tipo de distorsións debido a lente da cámara coa que foron tomadas.

Por outra parte, tamén se propón o uso de gradientes na realización da correlación cruzada. Isto permite normalizar os posibles picos erróneos que se poden obter neste proceso podendo afinar máis no achado do ángulo e do escalado correctos así como na normalización.

Vistas as melloras incluídas que poderían aportar ao algoritmo procedeuse a implementalo para imaxes unidimensionais.

O gradiente proposto é o seguinte,

$$G_i = G_i(x) + j G_i(y) \quad (6.31)$$

sendo  $i = 1$  cando se trata da imaxe de referencia, e  $i=2$  cando falamos da imaxe a rexistrar. Por outra banda a correlación cruzada baseada en gradientes defínese do seguinte xeito

$$NGC(u) \triangleq \frac{G_1(u) \star G_2^*(-u)}{|G_1(u)| \star |G_2^*(-u)|}. \quad (6.32)$$

Finalmente o algoritmo quedaría da seguinte maneira, onde se marcan os novos (ou os cambiantes) pasos en negra,

1. Cargar a imaxe de referencia e a imaxe a rexistrar.
2. Aplicar técnica de extracción de características a ambas imaxes.
3. **Realizar o gradiente (Ecuación 6.31) proposto a ambas imaxes.**
4. Realizar a FFT dos dous anteriores gradientes.
5. Centrar as FFT (*fftshift*) do paso anterior.
6. Multiplicar pola función do filtro os conxuntos de datos do paso anterior.
7. Realizar a transformada Log-Polar nos conxuntos de datos do paso anterior.
8. **Realizar a correlación cruzada baseada en gradientes (Ecuación 6.32) coas matrices resultantes da transformada Log-Polar.**
9. Ordenar de menor a maior (ou de maior a menor) os valores da matriz resultante da correlación.
10. Escollemos o pico máximo (ou picos posteriores a este se se decide analizar varios picos) e achamos o ángulo de rotación e o factor de escalado a partir das súas coordenadas.
11. Escalamos e/ou rotamos a imaxe a rexistrar dúas veces: coa escala obtida e co ángulo obtido e coa escala obtida e o ángulo+180°.
12. **Realizamos dúas correlacións cruzadas baseadas en gradientes (Ecuación 6.32) con cada matriz do paso anterior e coa imaxe de referencia orixinal.**
13. Buscamos o pico máximo das dúas matrices do punto anterior, quedándonos co maior dos dous que será o que coas súas coordenadas obteñamos o desprazamento e nos permita discernir de que ángulo se trata(ángulo ou ángulo+180°).

14. Rotamos, escalados e desprazamos a imaxe a rexistrar cos datos achados mediante o algoritmo.

Tras diversas probas púidose comprobar que estes cambios propostos non melloran o rexistrado e é polo que se desbotou este algoritmo. Finalmente quedámonos co algoritmo de 13 pasos descrito na Sección 6.2. Falarase máis a fondo disto no Capítulo 7 adicado as probas.

## 6.4. Algoritmo MLFFT

Como xa se dixo existen diversos factores que non garanten unha mellor precisión a hora de achar o ángulo de rotación e o factor de escala no primeiro algoritmo proposto neste traballo. Por unha parte estase calculando a Transformada de Fourier mediante unha Transformada de Fourier Discreta (DFT), mais concretamente mediante o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Isto é así debido as limitacións computacionais actuais para poder calcular a Transformada Infinita. Aínda que este erro de cálculo é obvio non debemos esquecernos del e telo en conta a hora de mellorar o algoritmo.

Existen fundamentalmente catro factores que lle afectan gravemente a calquera método de rexistrado de imaxes mediante a FFT [34]: o *aliasing* producido coas imaxes que conteñen rotación ao empregar a aproximación DFT, o *overlapping* producido nas imaxes escaladas, os erros de interpolación e outros erros: cambios de perspectiva, distorsións froito da cámara coa que foron tomadas as imaxes, etc.

O *aliasing* e o *overlapping* son críticos a hora de rexistrar as imaxes e son difíciles de evitar. Por outra parte tampouco podemos afirmar que as imaxes obtidas cunha cámara estean libres deste tipo de distorsións e moito menos doutras diferentes.

Estes erros lévanos a que a hora de escoller o pico máximo despois da correlación calculada para achar a rotación e o escalado sexa posiblemente incorrecto, debido a que estamos escollendo un pico falso, obtendo polo tanto un ángulo e unha escala non real. Nestes casos normalmente o correcto é algún pico posterior a ese, falando sempre de que os picos están ordenados de maior a menor.

A fin de reducir estes erros producidos por usar unha aproximación da Transformada de Fourier e que fan que se escolla un pico erróneo propónse a Transformada de Fourier Fraccional Multicapa (MLFFT) [35]. Esta consiste, a modo resume, en calcular diferentes FFT con maior resolución en zonas da imaxe, chamadas capas. A partir destas capas constrúese unha nova transformada log-polar que ao realizarse a partir de Transformadas de Fourier con maior resolución

enténdese que darán lugar a unha grella log-polar con menor erro e máis precisión, polo que a probabilidade de escoller un pico máximo incorrecto é menor. Imos ver isto máis a fondo.

Lembramos que a DFT ben definida pola seguinte ecuación

$$F(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)e^{-j\omega n} \quad (6.33)$$

onde  $0 \leq \omega \leq 2\pi$ . Supoñamos  $0 \leq k \leq N$  e reescribimos,

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)e^{-j\frac{2\pi k}{N}n} \quad (6.34)$$

onde  $k$  non é un enteiro e  $F(k)$  é o valor da FFT. Baseándonos nesta ecuación, a Transformada de Fourier Fraccional (MLFFT) defínese como

$$F^\alpha(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)e^{-j\frac{2\pi k}{N}\alpha n} \quad (6.35)$$

onde se introduce un novo parámetro ( $\alpha$ ) con respecto a Ecuación (6.34).

Se centramos a MLFFT, para un vector  $f = f(x)$ ,  $-N/2 \leq x \leq N/2$  esta ben definida pola seguinte ecuación [35]:

$$F^\alpha(k) = \sum_{n=-N/2}^{N/2} f(n)e^{-j\frac{2\pi k}{N+1}\alpha n}, \quad (-N/2 \leq k \leq N/2), \quad (6.36)$$

onde:

- Se  $\alpha = 1$ , a Transformada de Fourier Fraccional (FRFT) coincide coa FFT, así que obtemos os  $N + 1$  frecuencias distribuídos uniformemente en  $-\pi \leq \omega \leq \pi$  no dominio da frecuencia.
- Se  $0 < \alpha < 1$ , a FRFT devólvenos as  $N + 1$  frecuencias distribuídos uniformemente en  $-\alpha\pi \leq \omega \leq \alpha\pi$  no dominio da frecuencia.

Para calcular a FRFT 2D basta con aplicar a Ecuación (6.36) primeiro por cada fila e despois por cada columna.

A precisión do algoritmo MLFFT depende de dous parámetros que son elección do usuario: o número de capas e a resolución de cada unha delas. O número de capas ben definido por

$$L_{CAPA} = L, L \geq 1. \quad (6.37)$$

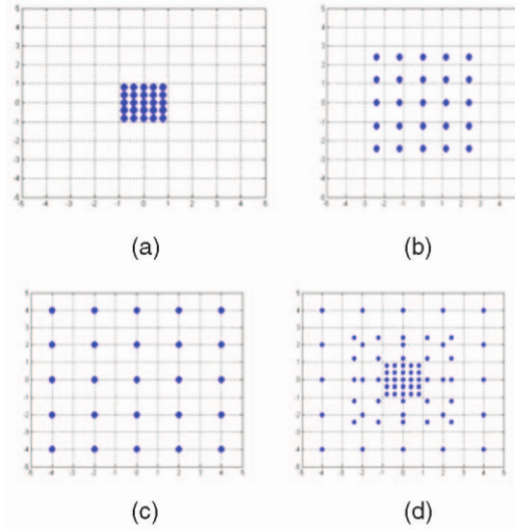


Figura 6.3: As diferentes capas/greñas dunha MLFFT con  $\{\text{Resolución}\} = \{0.1; 0.6; 1.0\}$  (a) Capa  $P_1$ , (b) Capa  $P_2$ , (c) Capa  $P_3$ , (d) Unión de capas ( $P$ ) (tomado de [35])

E a resolución de cada unha das capas ben determinado polo seguinte conxunto cuxa cardinalidade é igual ao número de capas,

$$\{\text{Resolución}\} = \alpha_i; 0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_{L-1} < \alpha_L = 1. \quad (6.38)$$

Entón, dada unha  $L_{CAPA}$  e un conxunto  $\{\text{Resolución}\}$  definimos a greña desa capa como

$$P_i = (\alpha_i u, \alpha_i v), \quad -N/2 \leq u, v \leq N/2, \quad (6.39)$$

$$\alpha_i \in \{\text{Resolución}\}, \quad 1 \leq i \leq L_{CAPA}.$$

Finalmente a greña conformada por todas as capas defínese como a unión de todas elas,

$$A = \bigcup_{i=1}^{L_{CAPA}} P_i. \quad (6.40)$$

Podemos ver de maneira gráfica as diferentes greñas ou capas e a unión de todas elas na Figura 6.3

Isto foi traducido a código da seguinte maneira. O usuario define na configuración mediante unha variable o número de capas que quere empregar, e a continuación define un vector onde se indica a resolución para cada unha das capas de menor a maior separación entre valores ( $\alpha$ ). O último valor deste vector, como se definiu na Ecuación (6.38), debe ser 1.0 que é a realización da propia

FFT que coincide coa MLFFT con  $\alpha = 1$ . Un exemplo é o seguinte, se temos  $L = 3$  un vector exemplo podería ser  $vector = 0,25; 0,75; 1,0$ .

Implementouse a MLFFT 1D segundo a Ecuación (6.35), aplicándoa primeiro por filas e logo por columnas a unha imaxe 2D. Calcúlanse todas a MLFFT de cada capa. Tívoise tamén que modificar a anterior transformada log-polar para agora xerar a súa grella con todas as capas collendo as frecuencias das capas onde apareza cada valor con maior resolución e polo tanto menor erro de interpolación. Noutras palabras, cando se calcula a Log-Polar obtemos unha coordenada cartesiana por cada coordenada log-polar cuxo valor queremos obter, é neste punto cando esta coordenada cartesiana se debe mapear para ver dentro de que capa cae, comezando como é lóxico na máis pequena (maior resolución).

Estes cambios son fáciles de introducir no algoritmo xa existente, basta con cambiar o módulo onde se realizaba FFT polo módulo da MLFFT e o módulo onde se realizaba a transformada Log-Polar pola nova transformada Log-Polar a partir das capas MLFFT. En resumidas contas, o algoritmo queda da seguinte maneira:

1. Cargar a imaxe de referencia e a imaxe a rexistrar.
2. Aplicar técnica de extracción de características a ambas imaxes.
3. Realizar a FFT a ambas imaxes.
4. Centrar a FFT (*fftshift*) en ambas imaxes.
5. Multiplicar pola función do filtro sobre os dous conxuntos de datos do paso anterior.
6. **Descentrar as frecuencias (*ifftshift*) sobre os dous conxuntos de datos do paso anterior.**
7. **Realizar a Transformada de Fourier Inversa (IFFT) sobre os dous conxuntos de datos do paso anterior.**
8. **Realizar a FRFT centrada nas diferentes capas coa súa resolución determinada polo usuario como un parámetro de entrada no dous conxuntos de datos do paso anterior.**
9. **Realizar a transformada Log-Polar MLFFT a partir das diferentes capas FRFT de cada unha das imaxes.**
10. Realizar a correlación cruzada (Enumeración 6.2.3) coas matrices resultantes da transformada Log-Polar.

11. Ordenar de menor a maior (ou de maior a menor) os valores da matriz resultante da correlación.
12. Escollemos o pico máximo (ou picos posteriores a este se se decide analizar varios picos) e achamos o ángulo de rotación e o factor de escalado a partir das súas coordenadas.
13. Escalamos e/ou rotamos a imaxe a rexistrar dúas veces: coa escala obtida e co ángulo obtido e coa escala obtida e o ángulo+180°.
14. Realizamos dúas correlacións cruzadas con cada matriz do paso anterior e coa imaxe de referencia orixinal.
15. Buscamos o pico máximo das dúas matrices do punto anterior, quedándonos co maior dos dous que será o que coas súas coordenadas obteñamos o desprazamento e nos permita discernir de que ángulo se trata(ángulo ou ángulo+180°).
16. Rotamos, escalados e desprazamos a imaxe a rexistrar cos datos achados mediante o algoritmo.

Os pasos marcados en negriña son os introducidos novos nesta nova versión. Podemos observar que se realiza sobre ambas imaxes o cálculo dunha IFFT no paso 7 que na versión anterior non se realizaba. Como xa foi explicado, un filtro está composto polo cálculo da FFT, posteriormente pola multiplicación destes datos pola función filtro e finalmente polo cálculo da IFFT. No anterior algoritmo realizar a IFFT do filtrado e unha posterior FFT propia deste tipo de algoritmos de rexistrado é equivalente a non facer nada. De aí a que foran omitidos estes pasos. Mais no algoritmo MLFFT despois do filtrado inicial substituíse, como xa foi explicado, a FFT por unha método máis preciso chamado FRFT o cal non é equivalente á FFT e polo tanto non se poden omitir estes pasos. O resto de pasos novos xa foron explicados no parágrafo anterior.

# Capítulo 7

## Validación e probas

Dende a implementación do primeiro algoritmo na iteración primeira fóronse realizando numerosas probas co fin de analizar cales son as mellores solucións de cara a conseguir un bo rexistrado de imaxes hiperespectrais. Neste capítulo preténdese resumir os resultados das investigacións e análises realizados e xustificar a conclusión deste traballo.

Presentaranse ademais as características das imaxes empregadas nas probas e as probas realizadas do módulo de rexistrado para a aplicación *HypeRvieW* (interface gráfica). Finalizando o capítulo especificaranse as probas de validación de requisitos e os seus resultados así como os resultados de probas realizadas engadíndolle diferentes niveis de ruído branco gaussiano á imaxe a rexistrar.

### 7.1. Imaxes empregadas nas probas

Para a realización das probas das técnicas de redución de dimensionalidade e os diferentes algoritmos empregáronse imaxes hiperespectrais de superficie terrestre das cales se describen a continuación as súas características.

A imaxe hiperespectral da Universidade de Pavia [13] foi tomada polo sensor ROSIS-03<sup>1</sup> en Pavia, ao norte de Italia. Esta imaxe ten unha dimensión espacial de 610 x 340 píxeles e 115 bandas situadas no rango espectral entre os 0.43 $\mu$ m ata os 0.86 $\mu$ m. Das 115 bandas foron eliminadas 12 bandas máis ruidosas, quedando entón un total de 103 bandas. Na Figura 7.1 podemos ver á dereita o aspecto da imaxe mediante a visualización dunha das súas bandas e a esquerda unha composición falsa a cor.

Tomada polo mesmo sensor, a imaxe hiperespectral do centro de Pavia [37] ten unha dimensión espacial de 1096 x 715 píxeles e 102 bandas. Ámbalas dúas

---

<sup>1</sup>ROSIS (Reflective Optics System Imaging Spectrometer)

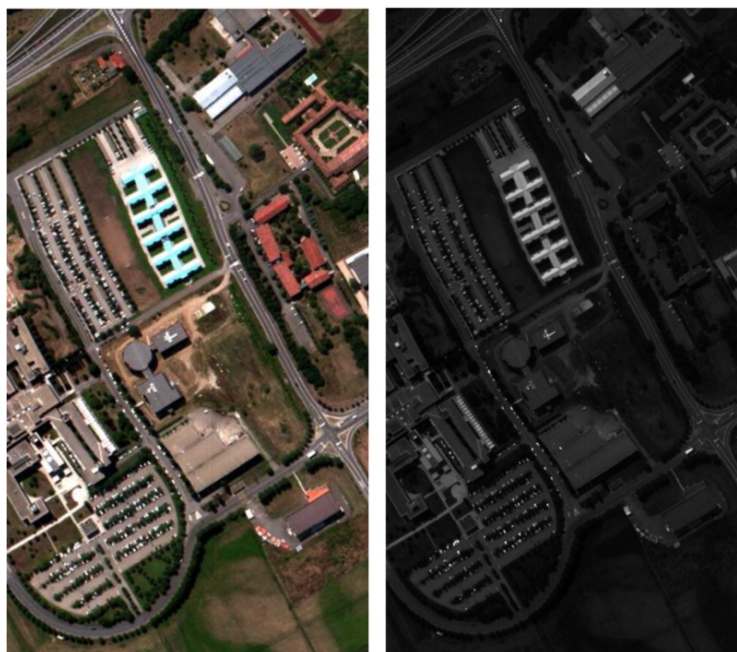


Figura 7.1: Imaxe hiperespectral Universidade de Pavia. Composición falsa a cor (esquerda) e banda 12 da imaxe (dereita).

destacan pola súa excelente resolución espacial onde cada píxel representa 1.3 metros. Pódese ver na Figura 7.2 o aspecto desta imaxe.

En cambio a imaxe hiperespectral Salinas [36] foi tomada polo sensor AVIRIS<sup>2</sup> no val de Salinas en California. Ten unhas dimensións de 512 x 217 píxeles e 224 bandas orixinais, das que se descartaron 20 correspondentes a absorción de auga quedando entón nun total de 204 bandas. A súa resolución espacial é de 3.7 metros por píxel. Na Figura 7.3 pódese visualizar o aspecto dunha das bandas da imaxe hiperespectral e unha composición falsa a cor.

## 7.2. Técnicas de redución de dimensionalidade

Co fin de analizar cal das técnicas de redución de dimensionalidade e extracción de características é a mellor de cara o seu uso na realización do rexistrado de imaxes hiperespectrais realizáronse as seguintes probas.

Como xa se dixo no Capítulo 6 de Implementación as técnicas desenvolvidas e avaliadas neste proxecto son as seguintes:

---

<sup>2</sup>AVIRIS (Airborne Visible - Infrared Imaging Spectrometer)

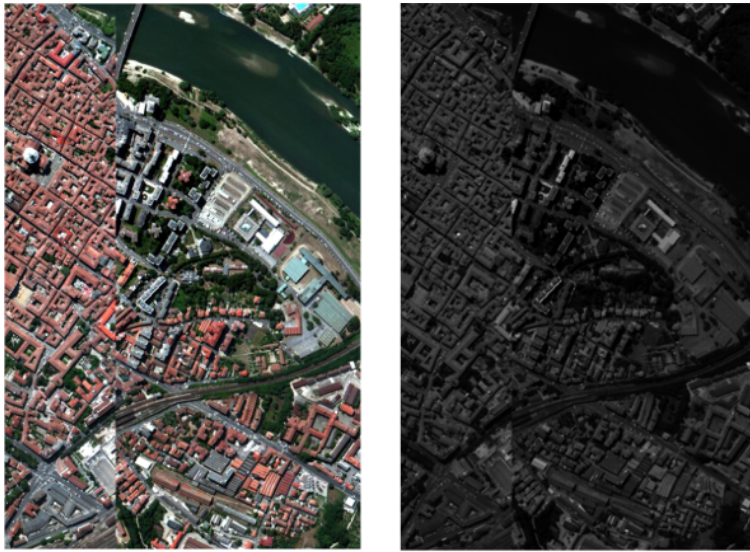


Figura 7.2: Imaxe hiperespectral do centro de Pavia. Composición falsa a cor (esquerda) e banda 48 da imaxe (dereita).

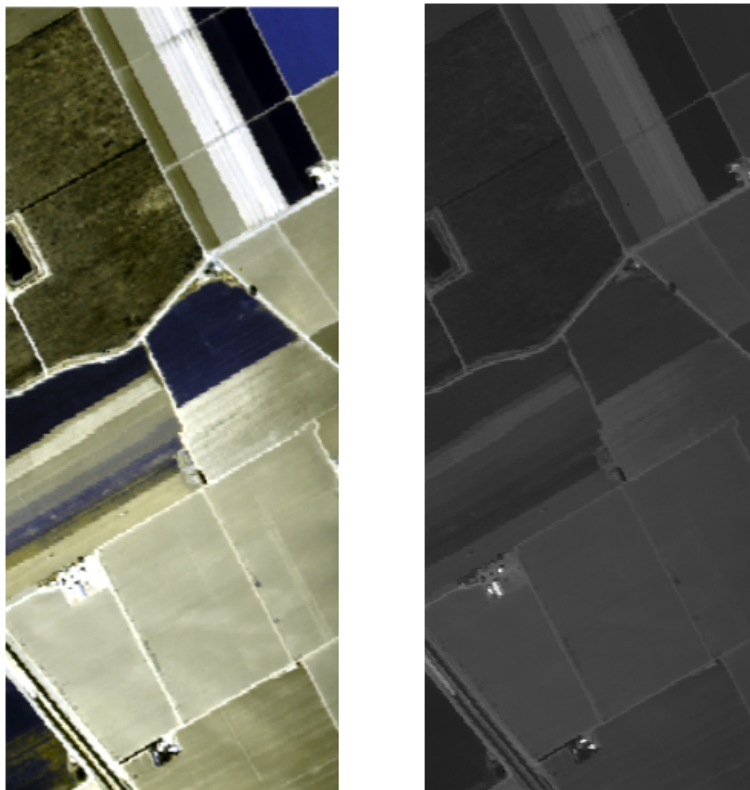


Figura 7.3: Imaxe hiperespectral do val de Salinas (California). Composición falsa a cor (esquerda) e banda 10 da imaxe (dereita).

- Aplicar o algoritmo a unha ou varias (de forma individual) bandas PCA.
- Gradiente RCMG sobre as imaxes orixinais.
- Gradiente RCMG sobre unha ou varias bandas PCA.
- Gradiente vectorial sobre as imaxes orixinais.
- Gradiente vectorial sobre unha ou varias bandas PCA.
- Media de unha ou varias bandas PCA.
- Media de todas as bandas PCA.

Escolleuse para a realización destas probas o algoritmo MLFFT por ser o que se presenta con mellores resultados previos en imaxes en escala de grises e RGB debido a integración da Transformada Fraccional de Fourier. No seguinte apartado realizaranse as probas e análises pertinentes para ver se isto é así no caso das hiperespectrais.

Seleccionouse para estas probas a imaxe hiperespectral da Universidade de Pavia debido a súa boa resolución espacial e por non contar con unha dimensión espacial moi grande, como é o caso da imaxe do centro de Pavia.

A proba deseñada neste caso consiste en xerar unha imaxe hiperespectral de Pavia rotada nun determinado ángulo e escalada nun determinado factor, para así realizar o proceso de rexistrado da mesma fronte a orixinal e ver se se achán os valores orixinais. O número de picos avaliados foron 50 e empregouse a interpolación bicúbica por ser a que mellor resultados presenta fronte as outras dúas tamén implementadas: interpolación máis cercana e interpolación bilineal.

Realizáronse as probas dende un factor de escala de 0.5 con un ángulo de rotación dende  $0^\circ$  (sen rotación) ata  $360^\circ$  con un aumento do ángulo de  $45^\circ$  e cun aumento de factor de escala de 0.5. É dicir, para un factor de escala de 0.5 probáronse os seguintes ángulos:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$  e  $315^\circ$ , o mesmo para un factor de escala de 1.0, de 1.5... ata acadar un factor de escala onde o algoritmo comeza a fallar.

Este factor de escala para a imaxe que estamos probando, a da Universidade de Pavia, trátase do factor de escala 3. Estes resultados preséntanse no Cadro 7.1, Cadro 7.2, Cadro 7.3 e Cadro 7.4. En todos eles amósanse na parte esquerda os valores orixinais que se lle aplicaron a imaxe a rexistrar e no resto de cadros da parte dereita os resultados achados. Marcouse cun recheo vermello, para facilitar a visualización dos resultados, aquelas probas para as que o algoritmo non fixo o

Valores orixinais		Gradiente vectorial		Gradiente RCMG	
Ángulo de rotación	Factor de escala	Ángulo de rotación	Factor de escala	Ángulo de rotación	Factor de escala
0.0	3.0	0.00	3.00	0.00	3.00
45.0	3.0	139.92	2.16	45.00	3.00
90.0	3.0	90.00	3.00	179.30	1.44
135.0	3.0	287.58	0.49	135.00	3.00
180.0	3.0	180.00	3.00	180.00	3.00
225.0	3.0	177.19	1.86	225.00	3.00
270.0	3.0	270.00	3.00	90.00	1.50
315.0	3.0	324.84	1.42	315.00	3.00

Cadro 7.1: Resultados das probas de rexistrado con gradiente vectorial e RCMG.

Valores orixinais		Gradiente vectorial das tres primeiras bandas PCA		Gradiente normal das tres primeiras bandas PCA	
Ángulo de rotación	Factor de escala	Ángulo de rotación	Factor de escala	Ángulo de rotación	Factor de escala
0.0	3.0	0.00	3.00	0.00	3.00
45.0	3.0	77.34	1.34	45.00	3.00
90.0	3.0	90.00	3.00	176.48	1.37
135.0	3.0	189.84	2.75	135.00	2.96
180.0	3.0	180.00	3.00	180.00	3.00
225.0	3.0	315.00	1.32	225.00	3.00
270.0	3.0	270.00	3.00	343.12	2.27
315.0	3.0	9.84	2.75	315.00	2.96

Cadro 7.2: Resultados das probas de rexistrado con gradiente vectorial e RCMG das tres primeiras bandas PCA.

Valores orixinais		Media das tres primeiras bandas PCA		Media de todas as bandas PCA		Primeira banda PCA	
Ángulo de rotación	Factor de escala	Ángulo de rotación	Factor de escala	Ángulo de rotación	Factor de escala	Ángulo de rotación	Factor de escala
0.0	3.0	0.00	3.00	0.00	3.00	0.00	3.00
45.0	3.0	45.00	3.00	45.00	3.00	45.00	3.00
90.0	3.0	90.00	3.00	90.00	3.00	90.00	3.00
135.0	3.0	135.00	3.00	135.00	3.00	135.00	3.00
180.0	3.0	180.00	3.00	180.00	3.00	180.00	3.00
225.0	3.0	225.00	3.00	225.00	3.00	225.00	3.00
270.0	3.0	270.00	3.00	270.00	3.00	270.00	3.00
315.0	3.0	315.00	3.00	315.00	3.00	315.00	3.00
0.0	3.5	0.00	3.52	0.00	3.52	0.00	3.52
45.0	3.5	45.00	3.52	45.00	3.52	45.00	3.52
90.0	3.5	90.00	3.52	90.00	3.52	90.00	3.52
135.0	3.5	135.00	3.52	29.53	1.28	135.00	3.52
180.0	3.5	180.00	3.52	180.00	3.47	180.00	3.52
225.0	3.5	225.00	3.52	225.00	3.52	225.00	3.52
270.0	3.5	270.00	3.52	270.00	3.52	270.00	3.52
315.0	3.5	315.00	3.52	210.23	1.37	315.00	3.52

Cadro 7.3: Resultados das probas de rexistrado con media das tres primeiras bandas PCA, con media de todas as bandas PCA e coa primeira banda PCA para factores de escala de 3.0 e 3.5.

Valores orixinais		Promedio das tres primeiras bandas PCA		Primeira banda PCA	
Ángulo de rotación	Factor de escala	Ángulo de rotación	Factor de escala	Ángulo de rotación	Factor de escala
0.0	4.0	359.30	3.97	0.00	4.02
45.0	4.0	45.00	4.02	45.00	4.02
90.0	4.0	90.00	3.97	90.00	3.97
135.0	4.0	180.70	1.00	208.12	0.66
180.0	4.0	179.30	3.97	180.00	4.02
225.0	4.0	225.00	4.02	225.00	4.02
270.0	4.0	270.00	3.97	270.00	3.97
315.0	4.0	179.30	0.86	28.12	0.66

Cadro 7.4: Resultados das probas de rexistrado con media das tres primeiras bandas PCA e coa primeira banda PCA para un factor de escala 4.0.

rexistrado correctamente.

Como podemos ver nos cadros 7.1 e 7.2 é indiferente a quen lle aplicamos o gradiente vectorial ou RCMG se ás bandas da imaxe directamente ou ás bandas PCA da imaxe pois os resultados non varían, fallan nos mesmos casos. Observamos tamén que o gradiente RCMG aporta mellores resultados que o vectorial xa que acerta 6 casos fronte a 4 do vectorial. Isto está dentro do agardado pois o gradiente RCMG é unha técnica máis avanzada como xa se explicou no Capítulo 6. En resumidas contas, o gradiente RCMG aporta mellores resultados que o vectorial mais ningún dos dous realiza o conxunto de probas para o factor de escala 3.0 con éxito.

Por outro lado no Cadro 7.3 amósanse os resultados de aplicar o rexistrado sobre o cálculo das compoñentes principais da imaxe, non sobre gradientes como no anterior descrito. As técnicas escollidas foron: a media das tres primeiras bandas PCA, pois como xa se dixo son as primeiras bandas as que adoitan concentrar toda a información sendo as derradeiras bandas ruído; a media de todas as bandas PCA e a primeira banda PCA. Neste caso a batería de probas para un factor de escala 3.0 foron cumpridas con éxito coas tres técnicas é por iso que se realizaron tamén as probas con factor de escala 3.5. Con factor de escala 3.5 vemos que para o caso da media das tres primeiras bandas PCA e para o caso da primeira banda PCA vólvense conseguir con éxito todas as probas mais no caso da media de todas as bandas PCA fallan 2 probas de 8 realizadas. Séguese pois probando coas dúas técnicas notables, tres primeiras bandas PCA e primeira banda PCA, desta vez con un factor de escala de 4. Os resultados desta proba son os que se amosan no Cadro 7.4 onde podemos ver que para ambas técnicas fallan os dous mesmos ángulos,  $135^\circ$  e  $315^\circ$ .

Podemos concluír entón que as mellores técnicas de redución de dimensionalidade e extracción de características das aquí desenvolvidas de cara o seu uso no rexistrado son a primeira banda PCA e a realización da media das tres primeiras bandas PCA. Vemos tamén que realizar o rexistrado sobre a media das tres primeiras bandas PCA da imaxe se obteñen os mesmos resultados que realizándoos sobre a primeira banda PCA.

Como xa se dixo, no módulo de *HypeRvieW* (interface gráfica) só se integrarán as mellores solucións para así obter unha mellor usabilidade de cara o usuario final. É por isto que se incorporará soamente a opción de empregar a primeira banda PCA, pois acabamos de ver que realizala media das tres primeiras bandas PCA aporta os mesmos resultados. A outra opción que se incluírá será a media de todas as bandas PCA, pois foi a outra técnica coa que se conseguiron bos resultados e tense observado que en imaxes cunha peor resolución espacial (a distancia real que representa cada píxel é maior) e con menor tamaño se obteñen

mellores resultados que empregando só a primeira banda PCA.

### 7.3. Algoritmos

Neste traballo foron desenvolvidos tres algoritmos de rexistrado baseados na Transformada de Fourier: primeiro algoritmo ou Fourier-Mellin (de aquí en diante algoritmo FFT), algoritmo gradientes e o algoritmo MLFFT, onde os últimos baseáronse no primeiro introducíndolle melloras. É preciso entón analizar e concretar cal deles é o máis eficiente e exacto de cara o seu uso con imaxes hiperespectrais e tamén coñecer as magnitudes de estes perfeccionamentos.

Probaremos con cada algoritmo o rexistrado das tres imaxes hiperespectrais presentadas neste capítulo (Universidade de Pavia, centro de Pavia e val de Salinas). Para elo, escalaremos e rotaremos a imaxe cun factor de escala e ángulo coñecido e intentaremos rexistrar a imaxe resultante coa orixinal. Os factores de escala probados comezan en 0.5 con un paso de 0.5 e finalizarán cando se detecte que o algoritmo comeza a non acertar o factor de escala en grandes porcentaxes. Con cada factor de escala escollido probaranse ángulos de rotación dende  $0^\circ$  (sen rotación) ata  $355^\circ$  cun paso de  $5^\circ$ . Noutras palabras, comezaremos probando un factor de escala de 0.5 cos ángulos  $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, \dots, 355^\circ$ , seguiremos cun factor de escala 1 cos ángulos  $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, \dots, 355^\circ$ , así ata que o algoritmo comece a fallar. Aplicaremos o rexistrado sobre a primeira banda PCA das imaxes, pois como se veu no apartado anterior é a técnica de redución de dimensionalidade e extracción de características principais coa que se obteñen mellores resultados. Avaliaremos como nas probas anteriores 50 picos e empregaremos tamén a interpolación bicúbica no cálculo da log-polar e nos rotados e escalados.

Preséntanse entón os resultados das probas. O algoritmo que aplica gradientes foi desbotado debido a que é incapaz de achar os valores de aliñamento en probas moi simples, é dicir, pódese afirmar que non funciona do xeito no que o afirman os seus artigos [33][38].

Para a imaxe hiperespectral da Universidade de Pavia conséguese achar todos os ángulos ata un factor de escala de 3.5 tanto co algoritmo FFT como co algoritmo MLFFT. Con un factor de 4.0 obtéñense bos resultados no 54,74 % dos casos mediante o algoritmo FFT e nun 65.28 % dos casos mediante o algoritmo MLFFT.

Para a imaxe do centro de Pavia os resultados son mellores debido a que ten maiores dimensións. Tanto co algoritmo FFT como co MLFFT chégase a achar todos os ángulos de rotación das probas ata un factor de escala de 5.5. Con un factor de escala de 6, o algoritmo FFT acepta no 65.28 % dos casos mentres que o algoritmo MLFFT no 66.67 % dos casos. Podemos ver esta información resumida

	Algoritmo FFT		Algoritmo MLFFT	
	Universidade de Pavia	Centro de Pavia	Universidade de Pavia	Centro de Pavia
Factor de escala conseguido con calquera rotación	3.5	5.5	3.5	5.5
Porcentaxe de acerto no seguinte factor de escala	54.17%	65.28%	72.22%	66.67%

Cadro 7.5: Resultados das probas de rexistrado co algoritmo FFT e MLFFT para as imaxes da Universidade e do centro de Pavia.

no Cadro 7.5.

Os resultados para a imaxe hiperespectral do val de Salinas pódense ver no Cadro 7.6. Neste caso avaliamos os resultado dunha forma diferente que os das imaxes obtidas co sensor ROSIS. Debido a súa baixa resolución espacial onde cada píxel representa 3.7 metros da superficie terrestre e as súas pequenas dimensións, os resultados de rexistrado son peores que nos anteriores casos. No Cadro 7.6 pódese ver, igual que nas anteriores imaxes, que a mellor solución é o uso do algoritmo MLFFT chegando a haber neste caso unha diferenza de máis dun 50 % de acertos nalgúns factores de escala.

Factor de escala	Porcentaxe de acerto das probas con diferentes ángulos	
	Algoritmo FFT	Algoritmo MLFFT
<b>0.5</b>	8.33 %	59.72 %
<b>1</b>	48.61 %	91.67 %
<b>1.5</b>	41.67 %	72.22 %
<b>2</b>	41.67 %	73.61 %
<b>2.5</b>	37.50 %	61.11 %

Cadro 7.6: Resultados das probas de rexistrado co algoritmo FFT e MLFFT para a imaxe do val de Salinas.

Podemos concluír e confirmar que o mellor algoritmo de rexistrado para imaxes hiperespectrais é o algoritmo MLFFT que incorpora a Transformada Fraccional de Fourier, aplicado sobre a primeira banda PCA.

## 7.4. Probas con ruído branco

Para probar a eficiencia do método de rexistrado desenvolvido engadíuselle diferentes niveis de ruído branco gaussiano á imaxe que se pretende rexistrar.

Noutras palabras, a imaxe de referencia non se modifica sen embargo antes de xerar (rotar, escalar e desprazar) a imaxe que imos aliñar respecto da de referencia váiselle engadir unha certa cantidade de ruído branco.

O ruído branco é unha sinal aleatoria que se caracteriza porque os seus valores en instantes diferentes de tempo non teñen relación entre si. O ruído branco gaussiano é aquel cuxa función de densidade segue unha distribución normal. Este tipo de ruído é o que teñen as imaxes hiperspectrais [39] como consecuencia dos defectos dos sensores, interferencias ambientais, etcétera. Por cada píxel e en cada compoñente espectral introduciráselle á imaxe que queremos rexistrar un valor diferente deste tipo de ruído.

Nestas probas intentaremos rexistrar a imaxe da Universidade de Pavia con diferentes niveis PSNR de ruído: 10dB, 16dB e 20dB. A relación sinal a ruído pico (PSNR) é un termo que define a relación entre a máxima enerxía posible dunha sinal e o ruído que afecta a súa representación orixinal (sen ruído). Defínese da seguinte forma,

$$\text{PSNR} = 10 \cdot \log_{10} \left[ \frac{\max [r(x, y, z)]^2}{\frac{1}{B \cdot V \cdot H} \cdot \sum_{z=0}^{B-1} \sum_{x=0}^{V-1} \sum_{y=0}^{H-1} [r(x, y, z) - t(x, y, z)]^2} \right] \quad (7.1)$$

onde  $r$  é a imaxe fidedigna sen ruído,  $t$  a imaxe con ruído,  $B$  o número de bandas,  $V$  o número de filas e  $H$  o número de columnas. Na Figura 7.4 pódese ver de xeito gráfico a cantidade de ruído introducida nas probas en cada unha das bandas da imaxe.

Empregaremos o algoritmo MLFFT sobre a primeira banda PCA das imaxes avaliando 50 picos e con interpolación bicúbica. En cada nivel de ruído probarase a rexistrar a imaxe da Universidade de Pavia aplicándolle un factor de escala e un ángulo coñecido. Os factores de escala probados comezan en 0.5 con un paso de 0.5 e finalizarán nun factor de 4, que é o máximo detectado para esta imaxe como se veu na sección anterior. Con cada factor de escala escollido probaranse ángulos de rotación dende  $0^\circ$  (sen rotación) ata  $355^\circ$  cun paso de  $5^\circ$ , como nas probas da sección anterior.

Os resultados achados pódense ver no Cadro 7.7. Neste amósase a porcentaxe de casos de rexistrado conseguidos correctamente dentro de cada factor de escala. En cada factor de escala estanse realizando, como xa se dixo, 72 probas de rexistrado con ese factor de escala e un ángulo diferente de cada vez. O cadro comeza no factor de escala 3 porque para os anteriores valores (0.5, 1.0, ... 2.5) realízase o rexistrado correctamente para todos os casos con calquera dos niveis

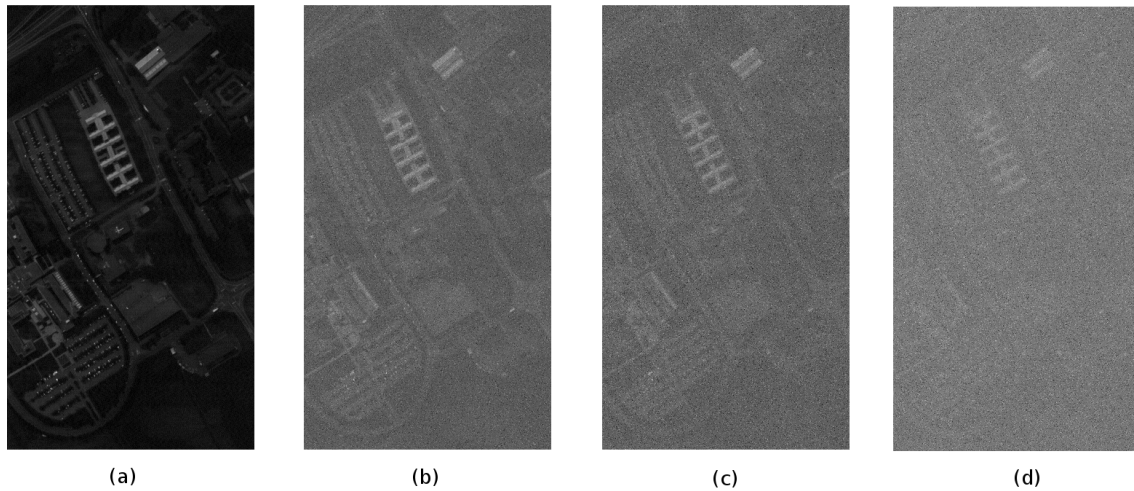


Figura 7.4: Imaxe da Universidade de Pavia. a) Banda 3 orixinal. b) Banda 3 con 20dB de ruído branco gaussiano. c) Banda 3 con 16dB de ruído branco gaussiano. d) Banda 3 con 10dB de ruído branco gaussiano.

de ruído probados. Como vemos nos resultados o algoritmo é tolerante a ruído ata certo factor de escala onde a eficiencia de este diminúe. Isto podería solucionarse facilmente engadindo un proceso de filtrado de ruído antes de realizalo rexistrado.

Escala/Ruído	20dB	16dB	10dB
<b>3</b>	100 %	100 %	84.72 %
<b>3.5</b>	94.44 %	79.17 %	34.72 %
<b>4</b>	47.22 %	33.33 %	5.56 %

Cadro 7.7: Resume dos resultados das probas con ruído. As porcentaxes indican a porcentaxe de rexistrados achados correctamente dentro de cada batería de probas (72 ángulos con cada factor de escala).

## 7.5. Módulo interface gráfica

Nesta sección expóñense as probas deseñadas que debe superar o módulo de rexistrado realizado para o programa *HypeRvieW*.

No Cadro 7.8 especificanse as probas co seu resultado agardado e cal foi o seu resultado. O campo resultado pode ter os seguintes valores: non funciona, funciona correctamente e funciona pero non é de todo correcto.

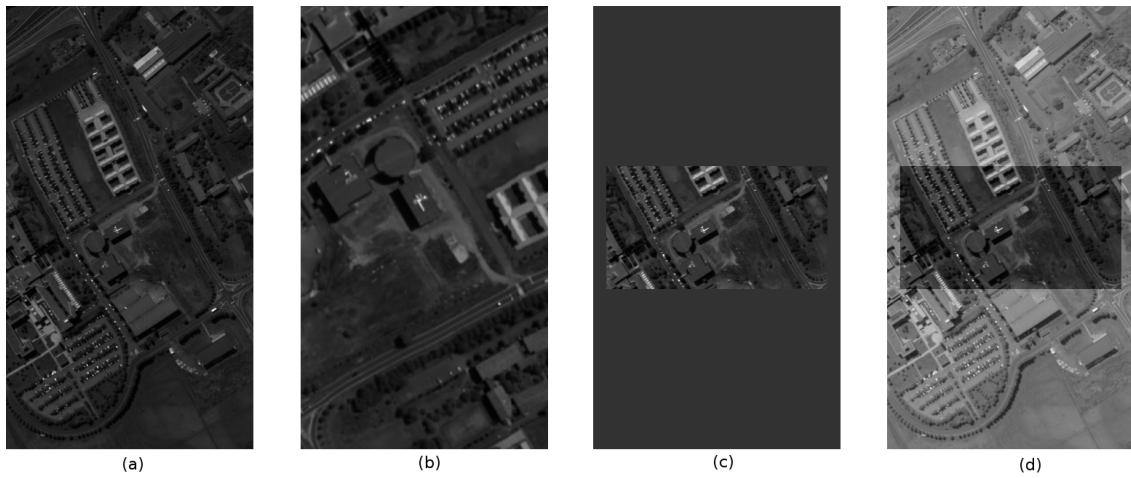


Figura 7.5: Rexistrado coa imaxe da Universidade de Pavia. a) Imaxe de referencia. b) Imaxe a rexistrar. Xerada a partir da de referencia (factor de escala 2 e ángulo de rotación  $90^\circ$ ). c) Resultado do rexistrado. d) Resultado superposto na imaxe de referencia.

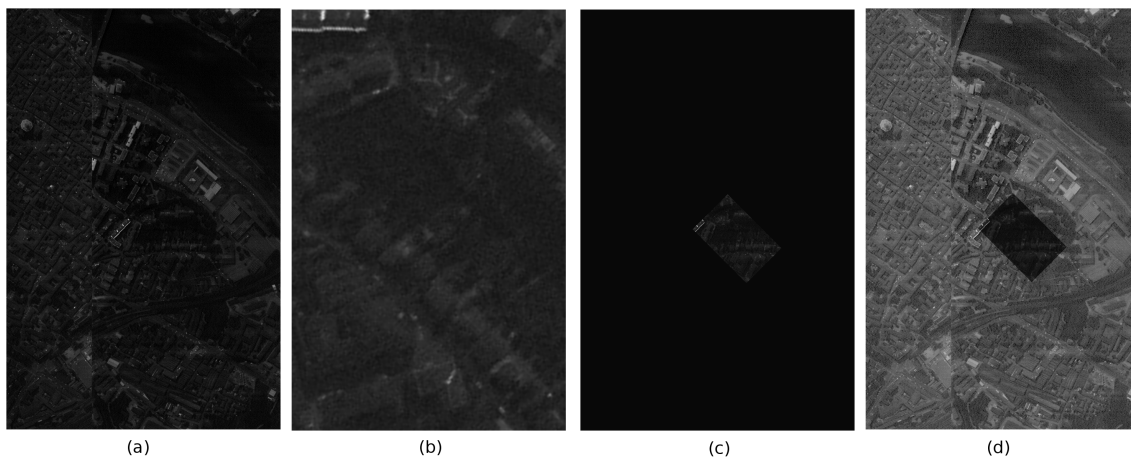


Figura 7.6: Rexistrado coa imaxe do centro de Pavia. a) Imaxe de referencia. b) Imaxe a rexistrar. Xerada a partir da de referencia (factor de escala 5.5, ángulo de rotación  $45^\circ$  e desprazamento no eixo  $x$  e  $y$  de 50 píxeles). c) Resultado do rexistrado. d) Resultado superposto na imaxe de referencia.

Ident.	Descrición	Proba	Resultado agardado	Resultado
PR-01	Rexistrar unha imaxe co algoritmo FFT.	Acceso á aplicación. Púlsase sobre o botón de abrir unha imaxe hiperespectral. Ábrese a imaxe da Universidade de Pavia. Especificanse os datos de tamaño da imaxe, tamaño, tipo e formato dos datos. Púlsase sobre o botón de configuración. Engádese o <i>plugin</i> “librexistrado”. Selecciónase dito <i>plugin</i> e púlsase sobre o botón Parámetros. Selecciónase o algoritmo FFT e o resto de valores quedan os que veñen por defecto (ángulo 0°, factor de escala 2 e desprazamento (0,0)). Púlsase sobre o botón Guardar e despois sobre o botón OK. Púlsase sobre o botón de Execución de procesado.	Apertura dunha nova ventána onde se especifique o resultado do rexistrado numericamente e graficamente. Imaxe rexistrada en formato RAW e PGM na carpeta “outputs”. Ángulo 0°, factor de escala 2 e desprazamento (0,0).	Funciona correctamente
PR-02	Rexistrar unha imaxe co algoritmo MLFFT.	Acceso á aplicación. Púlsase sobre o botón de abrir unha imaxe hiperespectral. Ábrese a imaxe da Universidade de Pavia. Especificanse os datos de tamaño da imaxe, tamaño, tipo e formato dos datos. Púlsase sobre o botón de configuración. Engádese o <i>plugin</i> “librexistrado”. Selecciónase dito <i>plugin</i> e púlsase sobre o botón Parámetros. Selecciónase o algoritmo MLFFT, especificase o ángulo de rotación de 90° e o resto de valores quedan os que veñen por defecto (factor de escala 2 e desprazamento (0,0)). Púlsase sobre o botón Guardar e despois sobre o botón OK. Púlsase sobre o botón de Execución de procesado.	Apertura dunha nova ventána onde se especifique o resultado do rexistrado numericamente e graficamente. Imaxe rexistrada en formato RAW e PGM na carpeta “outputs”. Ángulo 90°, factor de escala 2 e desprazamento (0,0).	Funciona correctamente (Figura 7.5)
PR-03	Rexistrar unha imaxe seleccionando como técnica de redución que non se aplique ningunha.	Acceso á aplicación. Púlsase sobre o botón de abrir unha imaxe hiperespectral. Ábrese a imaxe da Universidade de Pavia. Especificanse os datos de tamaño da imaxe, tamaño, tipo e formato dos datos. Púlsase sobre o botón de configuración. Engádese o <i>plugin</i> “librexistrado”. Selecciónase dito <i>plugin</i> e púlsase sobre o botón Parámetros. Selecciónase como técnica de redución “Ningunha”, factor de escala 1, ángulo 45 e o resto de valores quedan os que veñen por defecto. Púlsase sobre o botón Guardar e despois sobre o botón OK. Púlsase sobre o botón de Execución de procesado.	Apertura dunha nova ventána onde se especifique o resultado do rexistrado numericamente e graficamente. Imaxe rexistrada en formato RAW e PGM na carpeta “outputs”. Obtense un ángulo, factor de escala e desprazamento que non son correctos debido a realizalo rexistrado sobre unha única banda orixinal.	Funciona correctamente

Ident.	Descrición	Proba	Resultado agardado	Resultado
PR-04	Rexistrar unha imaxe seleccionando como técnica de redución a media de todas as bandas PCA.	Acceso á aplicación. Púlsase sobre o botón de abrir unha imaxe hiperespectral. Ábrese a imaxe da Universidade de Pavia. Especificanse os datos de tamaño da imaxe, tamaño, tipo e formato dos datos. Púlsase sobre o botón de configuración. Engádesse o <i>plugin</i> “librexistrado”. Selecciónase dito <i>plugin</i> e púlsase sobre o botón Parámetros. Selecciónase como técnica de redución “Media de todas as PCA”, factor de escala 2, ángulo 90 e o resto de valores quedan os que veñen por defecto. Púlsase sobre o botón Guardar e despois sobre o botón OK. Púlsase sobre o botón de Execución de procesado.	Apertura dunha nova ventána onde se especifique o resultado do rexistrado numericamente e graficamente. Imaxe rexistrada en formato RAW e PGM na carpeta “outputs”. Ángulo 90°, factor de escala 2 e desprazamento (0,0).	Funciona correctamente
PR-05	Rexistrar unha imaxe seleccionando como técnica de redución a primeira banda PCA.	Acceso á aplicación. Púlsase sobre o botón de abrir unha imaxe hiperespectral. Ábrese a imaxe do centro de Pavia. Especificanse os datos de tamaño da imaxe, tamaño, tipo e formato dos datos. Púlsase sobre o botón de configuración. Engádesse o <i>plugin</i> “librexistrado”. Selecciónase dito <i>plugin</i> e púlsase sobre o botón Parámetros. Selecciónase como técnica de redución “Primeira banda PCA”, factor de escala 5.50, ángulo 45, desprazamento no eixo X de 50 píxeles e 50 píxeles no eixo Y. O resto de valores quedan os que veñen por defecto. Púlsase sobre o botón Guardar e despois sobre o botón OK. Púlsase sobre o botón de Execución de procesado.	Apertura dunha nova ventána onde se especifique o resultado do rexistrado numericamente e graficamente. Imaxe rexistrada en formato RAW e PGM na carpeta “outputs”. Ángulo 45°, factor de escala 5.50 e desprazamento (50,50).	Funciona correctamente (Figura 7.6)

Cadro 7.8: Probas do módulo de rexistrado para *HypeRvieW* (interface gráfica).

## 7.6. Validación de requisitos

Despois do remate da última iteración compróbase e válidase que se cumpran todos os requisitos especificados para o proxecto. Detállase cada proba de validación seguindo a estrutura que se amosa no Cadro 7.9.

<b>Identificador</b>	Código único que identifica a proba. Estará formado polas letras “VPR-X” onde a “X” se cambia por un número.
<b>Descrición</b>	Descrición da proba levada a cabo.
<b>Requisito</b>	Requisito ou requisitos que afecta a proba.
<b>Resultado esperado</b>	Descrición do resultado que se espera obter para dar como cumprido o requisito ou os requisitos.
<b>Resultado</b>	Cumprido ou non cumprido.

Cadro 7.9: Cadro explicativo das probas de validación de requisitos.

As probas de validación van dende o Cadro 7.10 ata o Cadro 7.29.

<b>Identificador</b>	VPR-01.
<b>Descrición</b>	Cárgase a imaxe hiperespectral da Universidade de Pavia na ferramenta de rexistrado. Extraese a primeira banda. Rótase 90°, escálase cun factor de 2 e desprázase 40 píxeles esa primeira banda. Gárdase esta primeira banda en formato PGM.
<b>Requisito</b>	RF-01, RF-11 e RF-15.
<b>Resultado esperado</b>	Primeira banda da imaxe Universidade de Pavia en formato PGM rotada 90°, escalada cun factor de 2 e desprazada 40 píxeles. Vemos que isto é así no visualizador de imaxes de Ubuntu.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.10: Proba de validación VPR-01.

<b>Identificador</b>	VPR-02.
<b>Descrición</b>	Cárgase a imaxe hiperespectral da Universidade de Pavia na ferramenta de rexistrado. Rótase 90°, escálase cun factor de 3.5 e desprázase 40 píxeles esa primeira banda. Gárdase a imaxe hiperespectral resultante en formato RAW.
<b>Requisito</b>	RF-01, RF-12 , RF-14 e RNP-01.
<b>Resultado esperado</b>	Imaxe hiperespectral da Universidade de Pavia en formato RAW rotada 90°, escalada cun factor de 3.5 e desprazada 40 píxeles. Vemos que isto é así no programa <i>HypeRvieW</i> de visualización e clasificación de imaxes hiperespectrais desenvolvido polo grupo de investigación.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.11: Proba de validación VPR-02.

<b>Identificador</b>	VPR-03.
<b>Descrición</b>	Cárgase unha imaxe de pequeno tamaño con resultado coñecido. Calcúlanse as súas compoñentes principais. Gárdase a imaxe hiperespectral resultante en formato RAW.
<b>Requisito</b>	RF-01, RF-02 e RF-14.
<b>Resultado esperado</b>	Abrimos a imaxe resultante no programa <i>HypeRvieW</i> de visualización e clasificación de imaxes hiperespectrais desenvolvido polo grupo de investigación. As compoñentes principais concordan cos resultados previos coñecidos.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.12: Proba de validación VPR-03.

<b>Identificador</b>	VPR-04.
<b>Descrición</b>	Cárgase unha imaxe de pequeno tamaño con resultado coñecido. Calcúlase o seu gradiente RCMG. Gárdase a imaxe resultante en formato PGM.
<b>Requisito</b>	RF-01, RF-03 e RF-15.
<b>Resultado esperado</b>	Abrimos a imaxe resultante no visualizador de imaxes do sistema operativo Ubuntu. O gradiente RCMG concorda co resultado previo coñecido.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.13: Proba de validación VPR-04.

<b>Identificador</b>	VPR-05.
<b>Descrición</b>	Cárgase unha imaxe de pequeno tamaño con resultado coñecido. Calcúlase o seu gradiente vectorial. Gárdase a imaxe resultante en formato PGM.
<b>Requisito</b>	RF-01, RF-04 e RF-15.
<b>Resultado esperado</b>	Abrimos a imaxe resultante no visualizador de imaxes do sistema operativo Ubuntu. O gradiente vectorial concorda co resultado previo coñecido.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.14: Proba de validación VPR-05.

<b>Identificador</b>	VPR-06.
<b>Descrición</b>	Cárgase unha imaxe de pequeno tamaño con resultado coñecido. Áchanse as súas compoñentes principais (PCA). Calcúlase o gradiente RCMG das bandas PCA. Gárdase a imaxe resultante en formato RAW.
<b>Requisito</b>	RF-01, RF-05 e RF-14.
<b>Resultado esperado</b>	Abrimos a imaxe resultante no programa <i>HypeRvieW</i> de visualización e clasificación de imaxes hiperespectrais desenvolvido polo grupo de investigación. A imaxe resultante concorda cos resultados previos coñecidos.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.15: Proba de validación VPR-06.

<b>Identificador</b>	VPR-07.
<b>Descrición</b>	Cárgase unha imaxe de pequeno tamaño con resultado coñecido. Áchanse as súas compoñentes principais (PCA). Calcúlase o gradiente vectorial das bandas PCA. Gárdase a imaxe resultante en formato RAW.
<b>Requisito</b>	RF-01, RF-06 e RF-14.
<b>Resultado esperado</b>	Abrimos a imaxe resultante no programa <i>HypeRvieW</i> de visualización e clasificación de imaxes hiperespectrais desenvolvido polo grupo de investigación. A imaxe resultante concorda cos resultados previos coñecidos.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.16: Proba de validación VPR-07.

<b>Identificador</b>	VPR-08.
<b>Descrición</b>	Cárgase unha imaxe de pequeno tamaño con resultado coñecido. Por outra banda, rótese 90° e escálase cun factor de 2. Áchanse as compoñentes principais (PCA) de ambas imaxes, orixinal e modificada. Especificase que se quere aplicar o algoritmo de rexistrado iterativamente ás 3 primeiras bandas PCA individualmente. Imprímense os resultados por pantalla.
<b>Requisito</b>	RF-07.
<b>Resultado esperado</b>	Os resultados amosados por pantalla concordan cos aplicados a imaxe que queriamos rexistrar.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.17: Proba de validación VPR-08.

<b>Identificador</b>	VPR-09.
<b>Descrición</b>	Cárgase unha imaxe de pequeno tamaño con resultado coñecido. Áchanse as súas compoñentes principais (PCA). Calcúlase a media de todas as bandas. Imprímese por pantalla os valores numéricos da imaxe resultante.
<b>Requisito</b>	RF-08.
<b>Resultado esperado</b>	Os resultados concordan cos coñecidos anticipadamente.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.18: Proba de validación VPR-09.

<b>Identificador</b>	VPR-10.
<b>Descrición</b>	Cárganse dúas imaxes hiperespectrais, a de referencia e a que se quere rexistrar. Selecciónase un dos algoritmos e técnicas de redución desenvolvidas (algoritmo MLFFT sobre a primeira banda PCA das imaxes). Imprímese por pantalla o resultado do rexistrado.
<b>Requisito</b>	RF-09 e RF-13.
<b>Resultado esperado</b>	Os resultados amosados por pantalla concordan cos que coñeciamos da imaxe que queriamos rexistrar.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.19: Proba de validación VPR-10.

<b>Identificador</b>	VPR-11.
<b>Descrición</b>	Cárgase a imaxe hiperespectral da Universidade de Pavia na ferramenta de rexistrado. Rótase 180°, escálase cun factor de 3 e desprázase 50 píxeles esa primeira banda. Selecciónase un dos algoritmos e técnicas de redución desenvolvidas (algoritmo MLFFT sobre a primeira banda PCA das imaxes). Imprímese por pantalla o resultado do rexistrado.
<b>Requisito</b>	RF-10, RF-13 e RD-01.
<b>Resultado esperado</b>	Os resultados amosados por pantalla concordan cos especificados polo usuario para xerar a imaxe que se rexistrou.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.20: Proba de validación VPR-11.

<b>Identificador</b>	VPR-12.
<b>Descrición</b>	Especifícase por liña de comandos a localización da imaxe hiperespectral da Universidade de Pavia seguida dun ángulo (225°), un factor de escala de 2.5 e un desprazamento de 50 píxeles en ambos eixos (50 50). A continuación especifícase con un “1” que seleccionamos o algoritmo MLFFT e seguido dun espacio e un “2” para especificar que realizamos o rexistrado sobre a primeira banda PCA. Púlsase intro para a execución da ferramenta de rexistrado por liña de comandos. Ao finalizar imprímese o resultado do rexistrado por pantalla.
<b>Requisito</b>	RF-16, RF-13 e RD-01.
<b>Resultado esperado</b>	Os resultados amosados por pantalla concordan cos especificados polo usuario para xerar a imaxe que se rexistrou.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.21: Proba de validación VPR-12.

<b>Identificador</b>	VPR-13.
<b>Descrición</b>	Acceso á aplicación. Púlsase sobre o botón de abrir unha imaxe hiperespectral. Ábrese a imaxe do centro de Pavia. Especificanse os datos de tamaño da imaxe, tamaño, tipo e formato dos datos. Púlsase sobre o botón de configuración. Engádese o <i>plugin</i> “librexistrado”. Selecciónase dito <i>plugin</i> e púlsase sobre o botón Parámetros. Selecciónase como técnica de redución “Primeira banda PCA”, factor de escala 5.50, ángulo 45, desprazamento no eixo X de 50 píxeles e 50 píxeles no eixo Y. Especificamos que se avaliarán 50 picos. O resto de valores quedan os que veñen por defecto. Púlsase sobre o botón Guardar e despois sobre o botón OK. Púlsase sobre o botón de Execución de procesado.
<b>Requisito</b>	RF-17, RF-18, RF-19, RF-19, RF-20 , RF-21, RNP-01 e RD-01.
<b>Resultado esperado</b>	Comprobase que se poden especificar parámetros numéricos para a configuración do proceso de rexistrado e que permite escoller diferentes métodos de redución de dimensionalidade e de algoritmos. A imaxe inicial amósase por pantalla podendo navegar polas súas diferentes bandas. O resultado do rexistrado amósase numericamente e visualmente nunha nova vénzana de resultados, este concorda co especificado polo usuario.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.22: Proba de validación VPR-13.

<b>Identificador</b>	VPR-14.
<b>Descrición</b>	Compróbase que na memoria se atopa redactado as probas e conclusións de cal ou cales son as mellores solucións para o rexistrado de imaxes hiperespectrais das desenvolvidas neste traballo.
<b>Requisito</b>	RNP-02.
<b>Resultado esperado</b>	Capítulo de probas e conclusións redactado.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.23: Proba de validación VPR-14.

<b>Identificador</b>	VPR-15.
<b>Descrición</b>	Compróbase que a interface gráfica segue as liñas de deseño dos anteriores módulos da aplicación <i>HypeRvieW</i> , os cales pasaran probas de usabilidade e de heurísticas.
<b>Requisito</b>	RNP-03.
<b>Resultado esperado</b>	Liña de deseño da interface gráfica do módulo igual que o resto da aplicación <i>HypeRvieW</i> .
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.24: Proba de validación VPR-15.

<b>Identificador</b>	VPR-16.
<b>Descrición</b>	Compróbase que a interface gráfica conta cunha axuda onde se especifican os diferentes parámetros que debe introducir o usuario.
<b>Requisito</b>	RNP-04.
<b>Resultado esperado</b>	A interface gráfica inclúe axuda.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.25: Proba de validación VPR-16.

<b>Identificador</b>	VPR-17.
<b>Descrición</b>	Compróbase que o código dos algoritmos e técnicas de redución desenvolvidas foron realizados en linguaxe de programación C.
<b>Requisito</b>	RNO-01.
<b>Resultado esperado</b>	Código dos algoritmos e técnicas en linguaxe de programación C.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.26: Proba de validación VPR-17.

<b>Identificador</b>	VPR-18.
<b>Descrición</b>	Execútase a ferramenta de rexistrado nun sistema operativo con Linux.
<b>Requisito</b>	RNO-02.
<b>Resultado esperado</b>	A ferramenta funciona correctamente en todas as súas opcións.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.27: Proba de validación VPR-18.

<b>Identificador</b>	VPR-19.
<b>Descrición</b>	Compróbase que o módulo de rexistrado para <i>HypeR-vieW</i> está desenvolvido mediante GTK+.
<b>Requisito</b>	RNE-01.
<b>Resultado esperado</b>	Interface gráfica mediante GTK+.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.28: Proba de validación VPR-19.

<b>Identificador</b>	VPR-20.
<b>Descrición</b>	Compróbase que os algoritmos desenvolvidos están baseadas na Transformada Rápida de Fourier (FFT).
<b>Requisito</b>	RD-02.
<b>Resultado esperado</b>	Os algoritmos desenvolvidos empregan a FFT.
<b>Resultado</b>	Cumprido.

Cadro 7.29: Proba de validación VPR-20.

# Capítulo 8

## Conclusións

Neste Traballo de Fin de Grao levouse a cabo unha investigación de diferentes métodos de rexistrado de imaxes en escala de grises e RGB baseados na Transformada Rápida de Fourier (FFT) como son o algoritmo Fourier-Mellin, o algoritmo de gradientes e o algoritmo MLFFT (baseado na transformada de Fourier e na transformada fraccional de Fourier) entre outros indicados na bibliografía.

Estes métodos foron adaptados de cara ao seu uso con imaxes hiperespectrais para o cal se empregaron diferentes técnicas de redución de dimensionalidade e de extracción de características co obxectivo de procesar unha menor cantidade de información que nas imaxes de partida. As técnicas probadas foron as seguintes:

- Aplicar o algoritmo a unha ou varias (de forma individual) bandas PCA.
- Gradiente RCMG sobre as imaxes orixinais.
- Gradiente RCMG sobre unha ou varias bandas PCA.
- Gradiente vectorial sobre as imaxes orixinais.
- Gradiente vectorial sobre unha ou varias bandas PCA.
- Media de unha ou varias bandas PCA.
- Media de todas as bandas PCA.

As técnicas de redución de dimensionalidade que deron mellores resultados, no seu uso nos algoritmos de rexistrado, foron aquelas baseadas unicamente na análise de compoñentes principais. Concretamente o uso da primeira banda PCA e a media de todas as bandas PCA. Esta última funciona mellor en imaxes de pequeno tamaño.

Obtivéronse moi bos resultados chegando a detectar escalados de 5.50 coa imaxe hiperespectral do centro de Pavia empregando o algoritmo MLFFT aplicado

sobre a primeira das bandas PCA das imaxes hiperespectrais e para calquera valor de rotación e desprazamento sobre imaxes hiperespectrais reais. Isto concluíuse despois de diversas probas con todas as combinacións de algoritmos e técnicas de redución de dimensionalidade aquí desenvolvidas. Esta conclusión concorda co exposto teoricamente [35] pois a transformada fraccional de Fourier que incorpora o algoritmo MLFFT permítenos achar con maior precisión o ángulo de rotación, o factor de escala e o desprazamento.

Probouse tamén a tolerancia do algoritmo ante a presenza de ruído branco na imaxe a rexistrar, xa que este é o tipo de ruído normalmente presente nas imaxes por efecto dos sensores de medida e interferencias atmosféricas. Comprobouse que a eficiencia do rexistrado ante ruído diminúe cando a cantidade de ruído é moi alta e se pretenden detectar factores de escala altos. Este feito non limita a utilidade do algoritmo xa que é común a aplicación de algoritmos de redución de ruído deste tipo de imaxes antes do seu procesado.

Cumpríronse os principais obxectivos do traballo como a investigación de diferentes algoritmos xa existentes para rexistro de imaxes, a análise de diferentes técnicas de redución de dimensionalidade que nos permitan aplicar os algoritmos de rexistrado, o desenvolvemento das mellores solucións estudadas de ambos casos, etcétera.

Desenvolveuse unha ferramenta de rexistrado por liña de comandos que inclúe todos os algoritmos e técnicas de redución de dimensionalidade realizados neste proxecto. Cumpríronse todos os requisitos ademais dos opcionais, entre os cales destacan os requisitos asociados a dispoñer dunha interface gráfica con alta usabilidade que permita ao usuario realizar o rexistrado de imaxes hiperespectrais dunha maneira máis doada. Esta interface foi incluída nun módulo para unha aplicación máis ambiciosa de procesado de imaxes hiperespectrais, *HypeRvieW*, realizada polo grupo de investigación e aínda en desenvolvemento. Esta facilita o proceso de rexistrado pois destaca pola súa usabilidade e eficiencia aportando satisfacción ao usuario final nun contexto de uso.

## 8.1. Posibles ampliacións

Como xa foi comentado na sección anterior, ao remate deste Traballo de Fin de Grao conseguíronse con éxito o cumprimento de todos os requisitos acordados co cliente así como os obxectivos do proxecto. Mais existen unha serie de mellores e posibles ampliacións que quedaron fóra do alcance do proxecto, pois este está limitado temporalmente ás normas que rexe a universidade.

A principal mellora consistiría en seguir investigando para conseguir algorit-

mos máis precisos que sexan capaz de rexistrar imaxes con factores de escala máis grandes. Un dos puntos polos que se pode comezar a investigar é o que xa foi tratado neste traballo, que é diminuír a probabilidade de que se escolla o pico máximo erróneo despois de aplicar a correlación cruzada.

Outras posibles ampliacións ou mellores poderían ser as seguintes:

- Estudar, investigar e desenvolver novas técnicas de extracción de características que permitan obter un mellor rexistrado das imaxes hiperespectrais.
- Aumentar a compatibilidade permitindo realizar o rexistrado a partir ficheiros de imaxes hiperespectral noutros formatos.
- Desenrolar novas liñas de traballo dirixidas especificamente cara o proceso de rexistrado na interface gráfica.
- Incorporar a opción de abrir outra imaxe hiperespectral na interface gráfica co fin de realizar o rexistrado a partir de dúas imaxes aportadas polo usuario.



# Capítulo 9

## Glosario

### 9.1. Definicións

**Aliasing:** En procesamento de sinais e computación gráfica, é un efecto que causa que sinais continuas distintas se tornen indistinguibles cando se toman mostradas dixitalmente. Noutras palabras, é o defecto gráfico que fai que nunha imaxe as curvas e liñas presenten un efecto visual de tipo “serra” ou “escalón” debido a que están compostas por pequenos píxeles.

**Banda dunha imaxe:** Valores dunha imaxe hiperespectral a unha determinada lonxitude de onda.

**Branch:** En galego rama, son utilizadas para desenvolver funcionalidades illadas unha das outras en repositorios software. Permítenos poder traballar paralelamente en diferentes versións do produto ou de módulos e despois fusionalas na rama principal. A rama por defecto recibe o nome de *master*.

**Commit:** Confirmación dos cambios realizados no fluxo do traballo nun repositorio git.

**Gradiente morfolóxico:** En procesamento de imaxes é a diferenza entre a dilatación e a erosión dunha imaxe. Esta é unha imaxe na que cada valor de píxel indica a intensidade de contraste na veciñanza dese píxel. Empregase para a detección de bordes e segmentación entre outras cousas.

**Imaxe hiperespectral:** Imaxe na que cada píxel ven descrito por un vector de valores espectrais que se corresponden coa contribución da luz detectada nese punto en diferentes bandas do espectro, moito maior que o espectro visible polo ollo humano.

**Master:** Rama por defecto e principal dun repositorio git.

**Overlapping:** Tipo de ruído producido ao escalar unha imaxe.

**Push:** Acción de subir os cambios confirmados no repositorio local a un repositorio remoto.

**Stakeholder:** Termo empregado para referirse a calquera persoa que teña influencia directa ou indirecta sobre os requisitos do sistema. Entre os stakeholders atópanse os usuarios finais, os enxeñeiros que desenvolvan o sistema, os expertos do dominio do sistema, etcétera.

## 9.2. Acrónimos

**CMG:** Do inglés “Color Morphological Gradient”. Trátase dun gradiente morfolóxico aplicado a imaxes en cor.

**DFT:** Do inglés “Discrete Fourier Transform” e en galego “Transformada de Fourier Discreta”. É un tipo de transformada discreta empregada no análise de Fourier. Transforma unha función matemática noutra, obtendo unha representación no dominio da frecuencia, sendo a función orixinal unha función no dominio do tempo.

**FFT:** Do inglés “Fast Fourier Transform” e en galego “Transformada Rápida de Fourier”. É nome que recibe este eficiente algoritmo que permite calcular a Transformada Discreta de Fourier (DFT) e a súa inversa cun bo rendemento e eficiencia.

**FRFT:** Do inglés “Fractional Fourier Transform” e en galego “Transformada de Fourier Fraccional”.

**IFFT:** Do inglés “Inverse Fast Fourier Transform” e en galego “Transformada Rápida de Fourier Inversa”.

**MLFFT:** Do inglés “Multilayer Fractional Fourier Transform” e en galego “Transformada de Fourier Fraccional Multicapa”.

**PCA:** Do inglés “Principal Component Analysis” e en galego “Análise de Componentes Principais”.

**PGM:** Do inglés “Portable Gray Map Image”. É un formato de almacenamento de imaxes.

**PSNR:** Do inglés “Peak signal-to-noise ratio” e en galego “relación sinal a ruído pico”. Termo que define a relación entre a máxima enerxía posible dunha sinal e o ruído que afecta a súa representación orixinal (sen ruído).

**RAW:** Formato de imaxe hiperspectral que soporta a implementación adxunta a este traballo. É un formato de arquivo de imaxes que contén todos os datos da imaxe tal e como foron captados polo sensor dixital sen ningún tipo de procesado.

**RCMG:** Do inglés “Robust Color Morphological Gradient”. Trátase dun gradiente morfolóxico máis robusto aplicado a imaxes en cor.

**RGB:** Do inglés “Red Blue Green”. Sistema de cores aditivas formado polo vermello, azul e verde.



# Apéndice A

## Manual de usuario

Neste capítulo inclúese toda a información necesaria para aquelas persoas que utilicen a ferramenta de rexistrado por liña de comandos ou o módulo de rexistrado para *HypeRvieW*: instalación, utilización e configuración.

### A.1. Módulo *HypeRvieW*

#### A.1.1. Manual de instalación

A continuación explícase como compilar o código fonte e como executar a versión pre-compilada que se inclúe no CD subministrado con esta memoria.

#### Compilación do código

Para a compilación do código tan só debemos acceder ao directorio “Codigo” e executar o comando *make*, sendo necesario dispoñer dun equipo con sistema operativo Linux coas seguintes librarías instaladas:

- GTK+-2.0
- Glade-2.0.
- Gmodule-export-2.0.
- Pango.
- Matio.
- HDF5.
- LAPACK.
- LAPACK con BLAS.

- Librería de compresión Z.
- FFTW.

### Código precompilado

No CD suministrado coa memoria inclúese unha versión precompilada da aplicación realizada sobre un equipo con Ubuntu 14.04 LTS (64-bits). É necesario dispoñer desta versión de Ubuntu para asegurar o bo funcionamento do programa precompilado.

### A.1.2. Rexistrado dunha imaxe

Nesta sección explícase como realizar o rexistrado dunha imaxe hiperespectral mediante o módulo desenvolvido para a aplicación *HypeRvieW*.

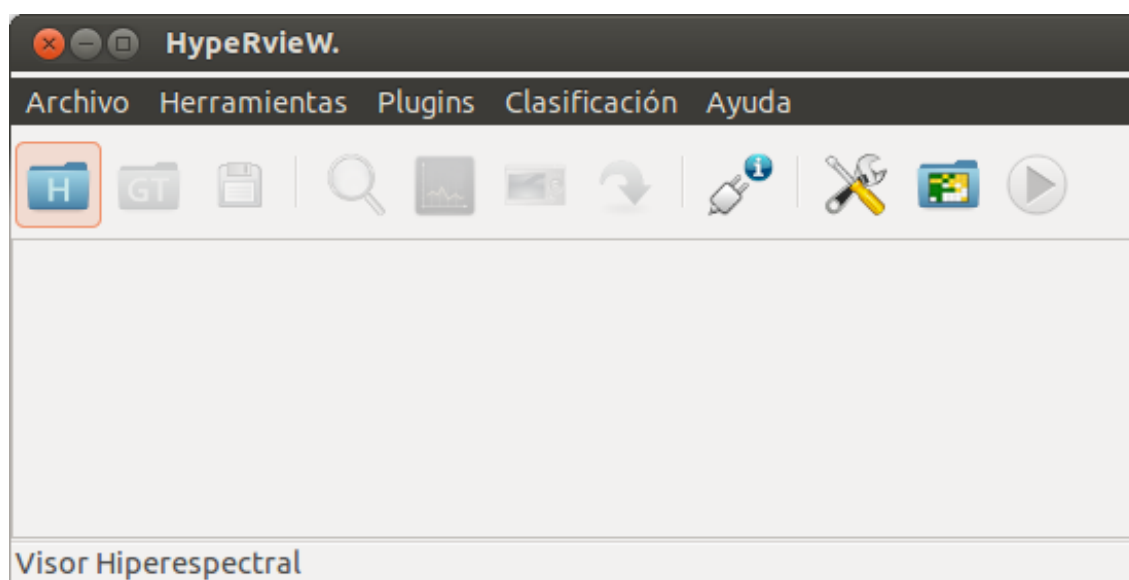


Figura A.1: Aspecto inicial da aplicación.

Na Figura A.1 podemos ver o aspecto inicial da aplicación. Comezamos abrindo unha imaxe hiperespectral. Para iso podemos empregar a ícona da bara de ferramentas amosada na Figura A.2, acceder á opción “Abrir hiperespectral” no menú “Archivo” ou usar a combinación de teclas “Ctrl+1”. Pódese ver na Figura A.3 a ventana que nos permite seleccionar o ficheiro da imaxe hiperespectral.

Debemos seleccionar unha imaxe con formato RAW. Este formato require que lle indiquemos á aplicación unha serie de datos para que poida interpretar a imaxe.



Figura A.2: Icona da barra de ferramentas que permite abrir unha imaxe hiperespectral.

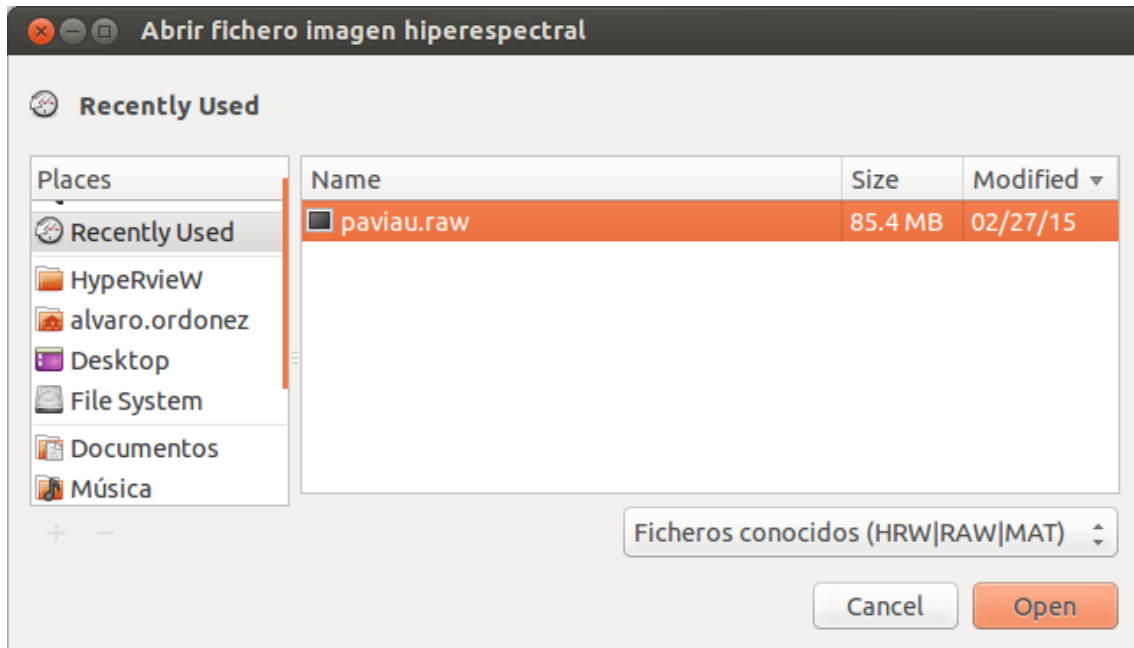


Figura A.3: Selección dunha imaxe hiperespectral.

- *Tamaño da imaxe:* Especificamos o alto, ancho e o número de bandas da imaxe.
- *Tamaño dos datos:* Indicar cal é o tamaño en bits de cada dato.
- *Tipo de datos:* Se os datos están almacenados como números enteiros ou decimais.
- *Formato dos datos:* Permite especificar a orde na que están colocados os datos no ficheiros. *Píxel-vector* indica que os datos atópanse almacenados en vectores do mesmo tamaño que o número de bandas, onde cada vector fai referencia a todos os datos de un píxel. Neste caso primeiro atopamos o vector do píxel 1, despois o vector do píxel 2, etcétera. *Band-vector* indica que os datos almacénanse por bandas, primeiro todos os píxeles da banda 1, despois todos os píxeles da banda 2 e así sucesivamente.
- *Tamaño da cabeceira do ficheiro:* É o número de bytes que se atopan antes dos propios datos da imaxe. Podemos usar o botón “Calcular tamaño cabecera” para averiguar o tamaño de esta.

Pódese ver na Figura A.4 o aspecto da ventana que pide esta serie de datos. Os datos das imaxes aportadas nesta memoria son os seguintes:

- Universidade de Pavia.
  - *Tamaño da imaxe*: Ancho 340, Alto 610 e Bandas 103.
  - *Tamaño dos datos*: 32 bits.
  - *Tipo de datos*: Decimal.
  - *Formato dos datos*: Píxel-vector.
  - *Tamaño da cabeceira do ficheiro*: 12.
- Centro de Pavia.
  - *Tamaño da imaxe*: Ancho 715, Alto 1096 e Bandas 102.
  - *Tamaño dos datos*: 32 bits.
  - *Tipo de datos*: Decimal.
  - *Formato dos datos*: Píxel-vector.
  - *Tamaño da cabeceira do ficheiro*: 12.
- Val de Salinas.
  - *Tamaño da imaxe*: Ancho 217, Alto 512 e Bandas 204.
  - *Tamaño dos datos*: 32 bits.
  - *Tipo de datos*: Decimal.
  - *Formato dos datos*: Píxel-vector.
  - *Tamaño da cabeceira do ficheiro*: 12.

Especificamos pois os datos e a aplicación deberanos amosar unha mensaxe situada na parte inferior indicándonos que a configuración é correcta ou non. Se é así prememos no botón “OK”, se non haberá que revisar os datos especificados.

Unha vez aberta a imaxe atoparémonos de volta na ventana principal do programa pero desta vez coa imaxe cargada como se amosa na Figura A.5. Dende esta ventana podemos facer diferentes accións, dende navegar entre as diferentes bandas empregando a rodiña do rato, gardar unha banda en formato PGM, facer zoom, visualizar un histograma, etcétera. Para unha maior clarificación de todas as opcións dispoñibles nesta ferramenta pódese consultar o seu manual na referencia bibliográfica [5].

Logo de cargar a imaxe, prememos no botón de configuración que ten o aspecto que se amosa na Figura A.6. Ábrenos unha ventana (Figura A.7) onde

Figura A.4: Ventana onde se especifican os datos dunha imaxe hiperspectral en formato RAW.

debemos seleccionar o módulo de rexistrado (“librexistrado”) e premer no botón de “Añadir”. Vemos así como este se engade na lista de “Plugins seleccionados”. Seleccionamos de novo o *plugin* pero desta vez na lista de “Plugins seleccionados” e prememos no botón “Parámetros”.

A continuación ábrenos unha nova ventana (Figura A.8) onde podemos especificar os parámetros do módulo de rexistrado. Consta dos seguintes parámetros:

- *Algoritmo*: Algoritmo a utilizar. O algoritmo MLFFT é unha mellora do algoritmo FFT.
- *Redución*: Método de redución de dimensionalidade que se realiza antes do proceso de rexistrado.
  - *1a Banda PCA*: Áchase as compoñentes principais das dúas imaxes e realízase o rexistrado sobre a primeira banda PCA.

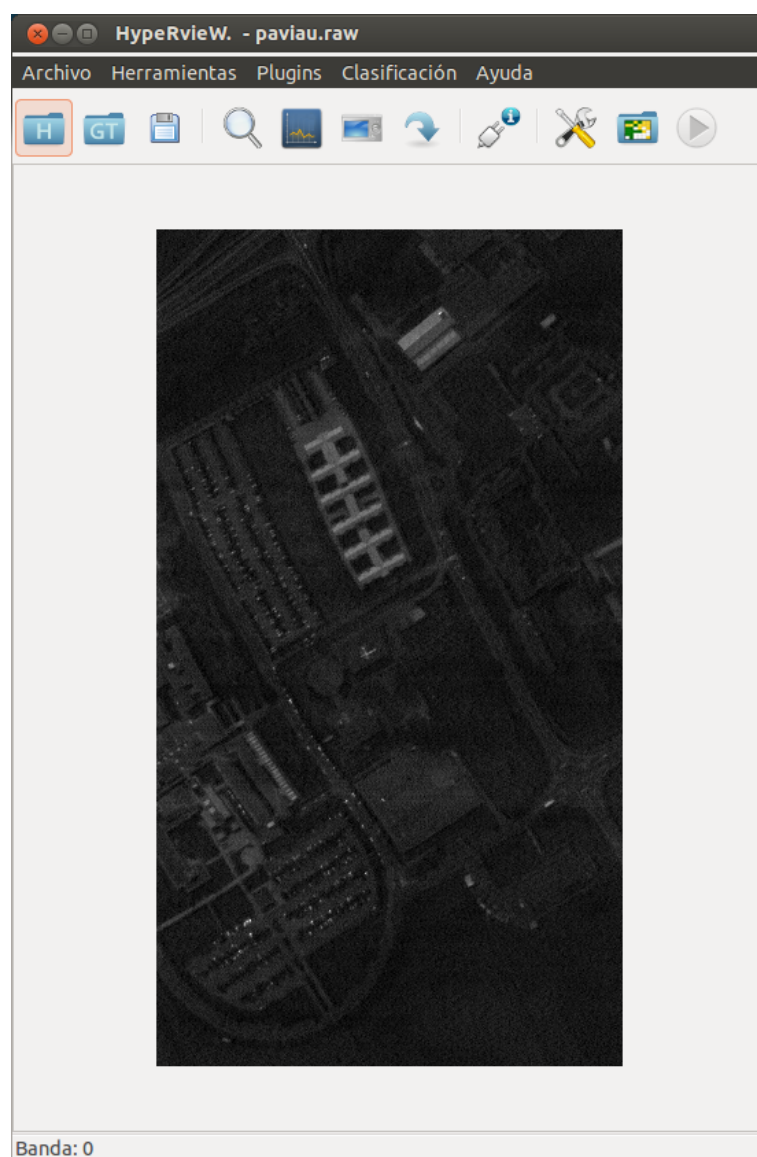


Figura A.5: Aplicación cunha imaxe hiperespectral cargada.



Figura A.6: Icona da barra de ferramentas que permite configurar os módulos.

- *Media de todas as PCA*: Áchase as compoñentes principais das dúas imaxes, realízase a media de todas as bandas PCA e faise o rexistrado sobre este promedio.
- *Ningunha*: Non se aplica ningunha técnica de redución. Realízase o rexistrado sobre unha das bandas a imaxe.

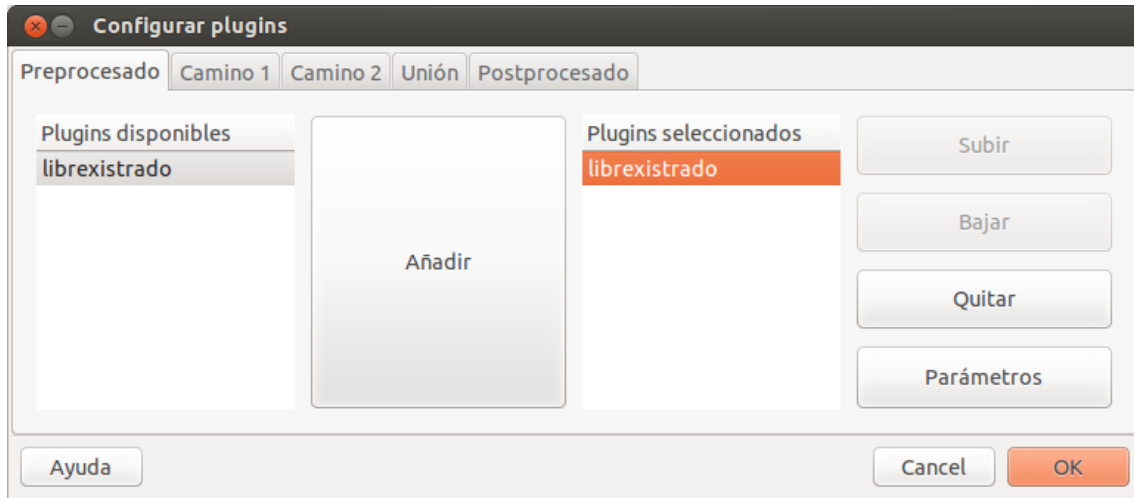


Figura A.7: Ventana de configuración de *plugins*.

- *Núm. Picos*: Número de picos a avaliar no proceso de rexistrado, é dicir, cantos picos máximos tras a correlación cruzada do cálculo do ángulo de rotación e do factor de escala se van avaliar para achar estes. Cantos máis se avalíen maior será a probabilidade de éxito. Rango de valores permitido de [1-100]. Por defecto 50.
- *Escala*: Factor de escalado para xerar a imaxe a rexistrar. Rango de valores permitido [0.3-8].
- *Ángulo*: Valor do ángulo de rotación en graos para xerar a imaxe a rexistrar. Rango de valores permitido [0-360].
- *Desprazamento*: Valores de translación para xerar a imaxe a rexistrar.
- *Ruído*: Posibilidade de engadir ruído branco gaussiano á imaxe a rexistrar para simular con maior realidade o rexistrado. Rango de valores permitido de [0-100] en tanto por cento, onde 0 é engadirlle ningunha cantidade de ruído e 100 a máxima aportada por esta funcionalidade. O PSNR para 100 é de 10dB e para 1 de 50dB aproximadamente.

Esta ventana tamén conta cunha axuda desligable na que se dispón toda a información sobre os parámetros explicada nos puntos anteriores.

Unha vez especificados os parámetros cos valores desexados prémese no botón “Guardar” e no botón “OK” da ventana de configuración de *plugins*. Volvemos atoparnos na ventana principal coa imaxe cargada mais agora está activado o botón de executar (Figura A.9). Prememos nó botón (ou empregamos o atallo de teclado “Ctrl+E”) e ábrese unha nova ventana onde irán aparecendo as saídas

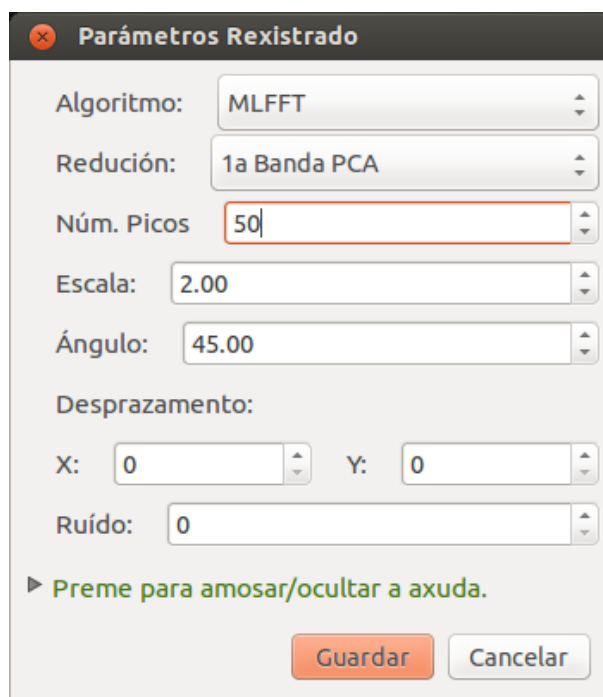


Figura A.8: Ventana de parámetros do módulo de rexistrado.

textuais que imprima o módulo e nos indica o estado do proceso (Figura A.10).



Figura A.9: Icona da barra de ferramentas que permite iniciar o proceso de rexistrado.

Prémese sobre o botón “Ejecutar” dando paso ao inicio do proceso de rexistrado cos parámetros que lle foron indicados. Pódemos ver na Figura A.11 o proceso de rexistrado en execución.

Unha vez rematado o rexistrado abrírase unha nova ventana onde se poderá ver a imaxe rexistrada e os resultados achados numericamente (Figura A.12).

A imaxe resultante do rexistrado pódese atopar na carpeta “Outputs” en formato RAW e PGM (primeira banda) entre outros ficheiros temporais que se xeran no proceso.

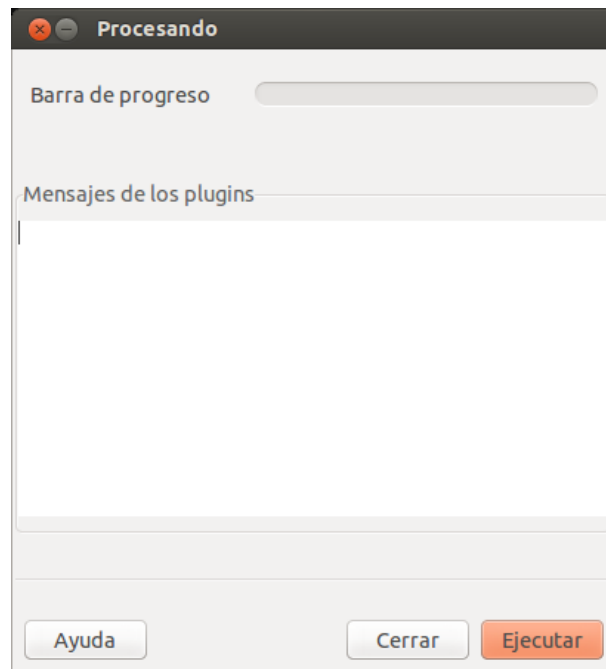


Figura A.10: Ventana de seguimiento do proceso de rexistrado.

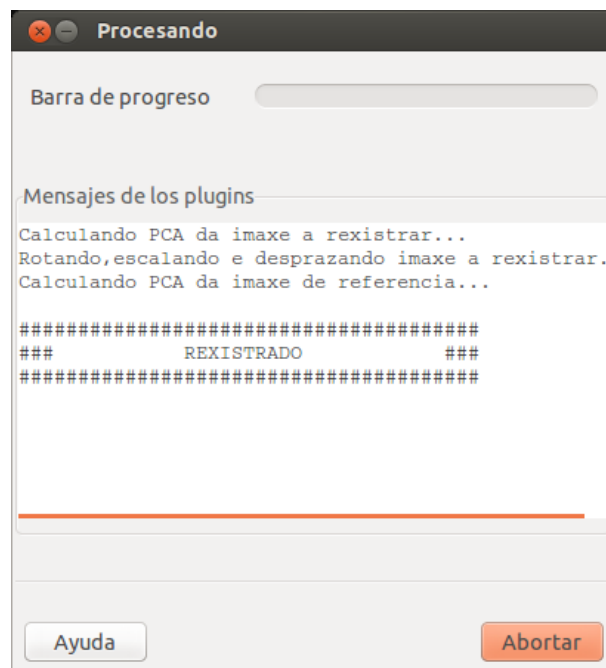


Figura A.11: Proceso de rexistrado en funcionamento.

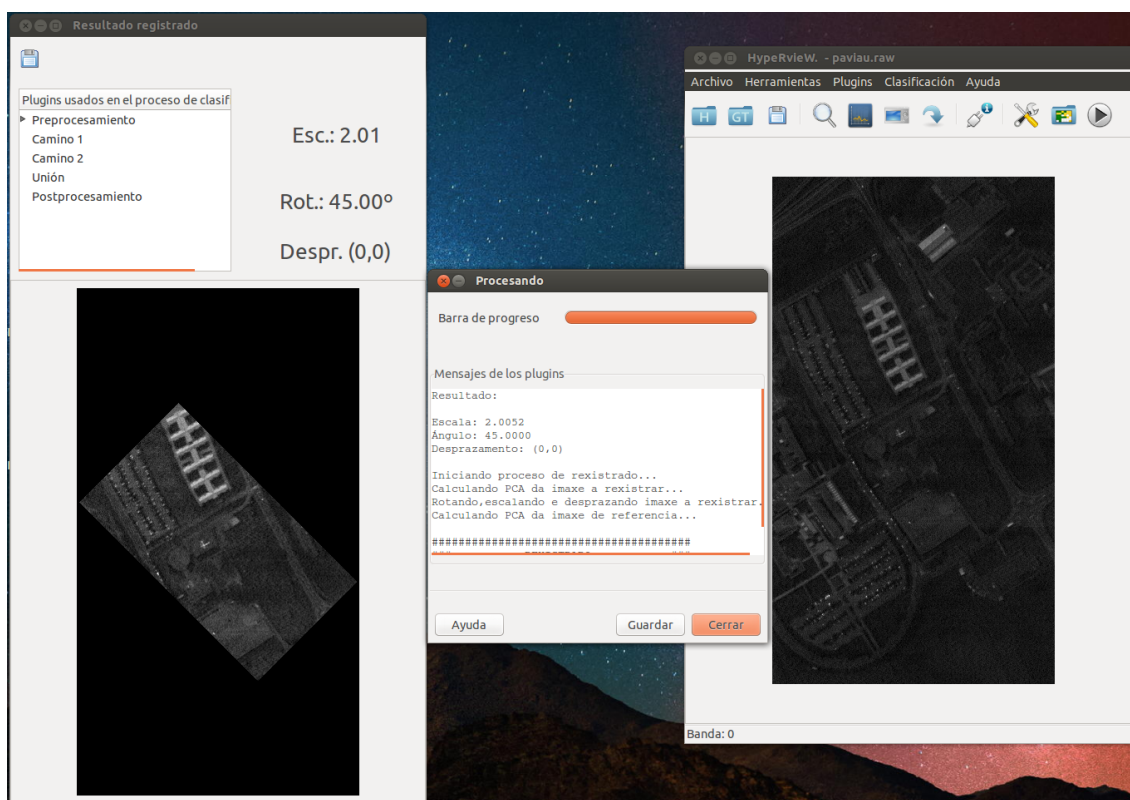


Figura A.12: Resultado do proceso de rexistrado.

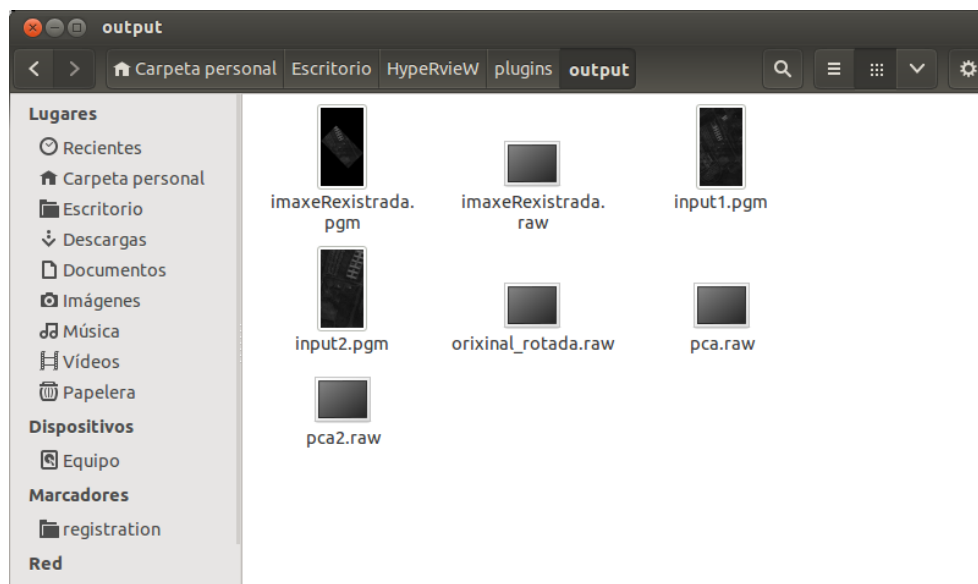


Figura A.13: Carpeta outputs coa imaxe rexistrada en formato RAW e PGM (primeira banda).

## A.2. Ferramenta de rexistrado por liña de comandos

### A.2.1. Manual de instalación

A continuación explícase os requirimentos e o proceso para compilar o código fonte e como executar a versión pre-compilada que se inclúe no CD subministrado con esta memoria.

#### Compilación do código

Para a compilación do código tan só debemos acceder ao directorio onde este se sitúe e executar o comando *make*, sendo necesario dispoñer dun equipo con sistema operativo Linux coas seguintes librarías instaladas:

- GFORTRAN.
- OPENBLAS.
- FFTW3.

#### Código precompilado

No CD subministrado coa memoria inclúese unha versión precompilada da ferramenta realizada sobre un equipo con Ubuntu 14.04 LTS (64-bits). É necesario dispoñer desta versión de Ubuntu para asegurar o bo funcionamento da ferramenta compilada.

### A.2.2. Execución e parámetros

Unha vez compilado o código ou se dispoñemos da versión previamente compilada tan só debemos executar este comando:

```
./rexistrado -f1 <imaxe_referencia> -H <ancho> -V <largo>
-B <bandas> [opcións]
```

onde en *-f1* debemos indicar a localización da imaxe de referencia, en *-H* o ancho da imaxe, en *-V* o largo e en *-B* o número de bandas que dispón. Estes parámetros son obrigatorios. En *[opcións]* pódese especificar calquera dos algoritmos e técnicas de redución desenvolvidos neste traballo e permite realizar o rexistrado a partir de dúas imaxes ou xerar unha imaxe a rexistrar para probar as diferentes solucións co ángulo de rotación, factor de escala e desprazamento indicados polo usuario, entre outras cousas que se detallan a continuación.

As opcións dispoñibles son as seguintes:

- **-a algoritmo:** Selección do algoritmo de rexistrado a empregar. Valores: 0 algoritmo FFT, 1 algoritmo MLFFT (defecto) e 2 algoritmo gradientes.
- **-r técnica de redución:** Selección da técnica de redución de dimensionalidade a empregar. Valores: 0 PCA, 1 media PCA, 2 ningunha técnica, 3 gradiente RCMG sobre PCA, 4 gradiente vectorial sobre PCA, 5 gradiente RCMG e 6 gradiente vectorial.
- **-f2 imaxe a rexistrar:** Localización da imaxe a rexistrar.
- **-n número de picos:** Número de picos a avaliar no proceso de rexistrado, é dicir, cantos picos máximos tras a correlación cruzada do cálculo do ángulo de rotación e do factor de escala se van avaliar para achar estes. Cantos máis se avalíen maior será a probabilidade de éxito. Por defecto 50. Máximo 100.
- **-b número de bandas a avaliar:** Por defecto 1, só a primeira banda. Por exemplo, se queremos realizar a media de todas as bandas PCA deberemos indicar neste parámetro o número total de bandas.
- **-ru ruído:** Posibilidade de engadir ruído branco gaussiano á imaxe a rexistrar para simular con maior realidade o rexistrado. Rango de valores permitido [0-100] en tanto por cento, onde 0 é engadirlle ningunha cantidade de ruído e 100 a máxima aportada por esta funcionalidade. O PSNR para 100 é de 10dB e para 1 de 50dB aproximadamente. Por defecto 0.
- **-i interpolación:** Interpolación empregada no cálculo da Log-Polar e nas transformacións das imaxes (escalar e rotar). Valores permitidos: 0 por aproximación, 1 bilineal e 2 bicúbica (defecto).

A continuación preséntanse aquelas opcións que só se permiten se non se especifica unha imaxe a rexistrar e se quere que esta sexa xerada a partir da primeira:

- **-e escala:** Factor de escalado para xerar a imaxe a rexistrar. Por defecto 2.
- **-an ángulo:** Valor do ángulo de rotación en graos para xerar a imaxe a rexistrar. Por defecto 0.
- **-dx desprazamento en X:** Valor de translación en píxeles sobre o eixo X para xerar a imaxe a rexistrar. Por defecto 0.
- **-dy desprazamento en Y:** Valor de translación en píxeles sobre o eixo Y para xerar a imaxe a rexistrar. Por defecto 0.

Uns exemplos de execución son os seguintes:

- Rexistrado empregando o algoritmo MLFFT e xerando a imaxe a rexistrar (factor de escala 3.5 e ángulo de rotación 345°).

```
./rexistrado -f1 imaxe_referencia.raw -H 340 -V 610 -B 103 -e  
3.5 -an 345
```

- Rexistrado de dúas imaxes empregando o algoritmo MLFFT e a primeira banda PCA.

```
./rexistrado -f1 imaxe_referencia.raw -H 340 -V 610 -B 103 -f2  
imaxe_a_rexistrar.raw
```

- Rexistrado empregando o algoritmo FFT e a media de todas as bandas PCA, xerando a imaxe a rexistrar (factor de escala 2 e ángulo de rotación 90°).

```
./rexistrado -f1 imaxe_referencia.raw -H 340 -V 610 -B 103 -e  
2 -an 90 -a 0 -b 103 -r 1
```

- Rexistrado empregando o algoritmo MLFFT e aplicando o gradiente RCMG sobre as 3 primeiras bandas PCA, e xerando a imaxe a rexistrar (factor de escala 3 e ángulo de rotación 45°).

```
./rexistrado -f1 imaxe_referencia.raw -H 340 -V 610 -B 103 -e  
3 -an 45 -r 3 -b 3
```



# Bibliografía

- [1] A. Plaza, J. A. Benediktsson, J. Boardman, et al., “Recent advances in techniques for hyperspectral image processing.” *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, pp. 110–122, 2009.
- [2] Alexander F.H. Goetz, Gregg Vane, Jerry E. Solomon, Barrett N. Rock. “Imaging spectrometry for Earth remote sensing.” *Science*, vol. 228, no. 4704, pp. 1147–1153, 7 de xuño de 1985.
- [3] Hans Grahn (Editor) e Paul Geladi (Editor), *Techniques and Applications of Hyperspectral Image Analysis*, John Wiley & Sons, setembro 2007.
- [4] O. Green, M. L. Eastwood, C. M. Sarture, T. G. Chrien, M. Aronsson, B. J. Chippendale, J. A. Faust, B. E. Pavri, C. J. Chovit, M. Solis et al. “Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS)” *Remote Sensing of Environment*, vol. 65, no. 3, pp. 227–248, 1998.
- [5] Jorge Alberto Suárez Garea, *Clasificación de imágenes de satélite de alta dimensionalidad*. Dirixida por Francisco Arguello e Dora B. Heras. Proxecto de Fin de Grao Enxeñaría Informática. Universidade de Santiago de Compostela, Escola Técnica Superior de Enxeñaría, setembro 2014.
- [6] Chen, Qin-sheng; Defrise, M.; Deconinck, F., “Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition.” *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions*, vol. 16, pp. 1156-1168, decembro 1994.
- [7] Peter Bunting, Frédéric Labrosse, Richard Lucas, “A multi-resolution area-based technique for automatic multi-modal image registration.” *Image and Vision Computing*, vol. 28, no. 8, pp. 1203-1219, agosto 2010.
- [8] Mahdi, H. e Farag, A.A., “Image registration in multispectral data sets.” *Image Processing. 2002. Proceedings. 2002 International Conference*, vol. 2, pp. II-369,II-372, 2002.
- [9] Erives Hector e Fitzgerald Glenn J., “Automated Registration of Hyperspectral Images for Precision Agriculture.” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 47, no. 2, pp. 103-119, maio 2005.

- [10] Erives Hector e Fitzgerald Glenn J., “Automatic Sub-pixel Registration for a Tunable Hyperspectral Imaging System.” *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006. IGARSS 2006. IEEE International Conference*, pp. 952-955, 31 de xullo-4 de agosto de 2006.
- [11] Siyue Chen; Qing Guo; Leung, H.; Bosse, E., “A Maximum Likelihood Approach to Joint Image Registration and Fusion.” *Image Processing, IEEE Transactions*, vol. 20, no. 5, pp. 1363-1372, maio 2011.
- [12] David Landgrebe, “Hyperspectral image data analysis.” *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 19, no. 1, pp. 17-28, xaneiro 2002.
- [13] Imaxe hiperespectral da Universidade de Pavia (Italia) (<http://www.ehu.eus/ccwintco/uploads/e/ee/PaviaU.mat>). Consultado o 9 de xuño do 2015.
- [14] Project Management Institute, *Guía de los Fundamentos de la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK)*, 3ª edición, Four Campus Boulevard, Newtown Square, 2004.
- [15] Instituto Nacional de Tecnologías de la Comunicación, *Guía Práctica de Gestión de Configuración*, decembro 2008.
- [16] Estudio Salarial Sector TIC Galicia 2014-2015. ([http://www.vitaedigital.com/download/NDQx/o\\_543\\_f\\_585.pdf](http://www.vitaedigital.com/download/NDQx/o_543_f_585.pdf)). Consultado o 8 de xuño do 2015.
- [17] Bases y tipos de cotización 2015. ([http://www.seg-social.es/Internet\\_1/Trabajadores/CotizacionRecaudaci10777/Basesytiposdecotiza36537/index.htm](http://www.seg-social.es/Internet_1/Trabajadores/CotizacionRecaudaci10777/Basesytiposdecotiza36537/index.htm)). Consultado o 8 de xuño do 2015.
- [18] Dell XPS 8700 Special Edition specs. (<http://www.pcworld.com/product/1253541/xps-8700-special-edition.html>). Consultado o 8 de xuño do 2015.
- [19] Worldwide Regulatory Compliance Engineering and Environmental Affairs. ([http://i.dell.com/sites/doccontent/shared-content/solutions/en/Documents/disp\\_p2414hb\\_us.pdf](http://i.dell.com/sites/doccontent/shared-content/solutions/en/Documents/disp_p2414hb_us.pdf)). Consultado o 8 de xuño do 2015.
- [20] Prezo da electricidade en tempo real. (<http://tarifaluzhora.es/>). Consultado o 8 de xuño do 2015.
- [21] Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), *Guía de Aprendizaje - Gestión De Riesgos en Proyectos Software*.

- [22] IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications, *IEEE Std 830-1998*, outubro 1998.
- [23] Ian Sommerville, *Ingeniería del software*, 7ª edición, Pearson Addison-Wesley, 2005.
- [24] José Manuel Cotos Yáñez, *Apuntes da Materia: Enxeñaría do Software*, 2012.
- [25] FFTW Home Page. (<http://www.fftw.org/>). Consultado o 28 de abril do 2015.
- [26] Pablo Quesada-Barriuso, Francisco Arguello e Dora B. Heras. Computing efficiently spectral-spatial classification of hyperspectral images on commodity GPUs. Tweedale, Jeffrey W., Jain, Lakhmi C. (Eds.) *Recent Advances in Knowledge-based Paradigms and Applications* (pp. 19-42), 1ª edición, Springer International Publishing, 2014.
- [27] A. Evans e X. Liu, “A morphological gradient approach to color edge detection”, *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 15, no. 6, pp. 1454–1463, xuño 2006.3
- [28] J. A. Richards e Xiuping Jia, *Remote Sensing Digital Image Analysis*, 4ª edición, Springer, Berlín, 2006.
- [29] R.C. Gonzalez e R.E. Woods, *Digital image processing*, 3ª edición, Prentice Hall, New York, 2007.
- [30] Rodarmel, C. e Shan, J. “Principal component analysis for hyperspectral image classification.” *Surveying and Land Information Science*, vol. 62, no. 2, pp. 115-122, 2002.
- [31] Sarvaiya, J.N.; Patnaik, S.; Bombaywala, S., “Image registration using log-polar transform and phase correlation”, *TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference*, pp.1,5, xaneiro 2009.
- [32] Reddy, B.S.; Chatterji, B.N., “An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration”, *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 5, no. 8, pp. 1266-1271, agosto 1996.
- [33] Tzimiropoulos, G.; Argyriou, V.; Zafeiriou, S.; Stathaki, T., “Robust FFT-Based Scale-Invariant Image Registration with Image Gradients”, *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions*, vol. 32, no. 10, pp. 1899-1906, outubro 2010.

- [34] Stone, Harold S., Tao, Bo and McGuire, Morgan. “Analysis of image registration noise due to rotationally dependent aliasing.”, *J. Visual Communication and Image Representation*, vol. 14, no. 2, pp. 114-135, 2003.
- [35] Wei Pan; Kaihuai Qin; Yao Chen, “An Adaptable-Multilayer Fractional Fourier Transform Approach for Image Registration”, *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions*, vol. 31, no. 3, pp. 400-414, marzo 2009
- [36] Imaxe hiperespectral do val de Salinas (California) ([http://www.ehu.es/ccwintco/uploads/a/a3/Salinas\\_corrected.mat](http://www.ehu.es/ccwintco/uploads/a/a3/Salinas_corrected.mat)). Consultado o 9 de xuño do 2015.
- [37] Imaxe hiperespectral do centro de Pavia (Italia) (<http://www.ehu.es/ccwintco/uploads/e/e3/Pavia.mat>). Consultado o 9 de xuño do 2015.
- [38] Divyang Patel e Vaibhav Gandhi, “. Image Registration Using Log Polar Transform and Fft Based Scale Invariant”, *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 4, no. 5, pp. 79-84, maio 2014.
- [39] Robert A. Schowengerdt, *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*, 3ª edición, Academic Press, setembro 2006.