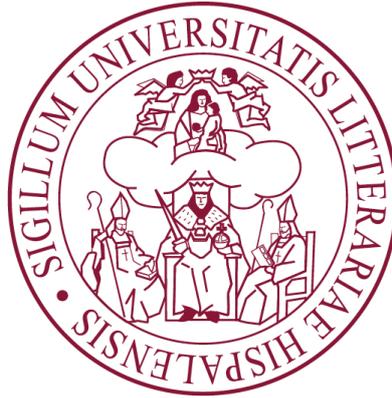


**Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de Telecomunicación**



**Aportaciones a la
Segmentación y Caracterización
de Imágenes Médicas 3D**

Ignacio García Fenoll

Tutoras:

Dra. Carmen Serrano Gotarredona

Dra. Begoña Acha Piñero

ENERO 2010

UNIVERSIDAD DE SEVILLA

A Gonzalo y Carmina, mis padres.

AGRADECIMIENTOS

Cuando uno echa la vista atrás, descubre que habría sido imposible llegar hasta aquí de no ser por mi familia y por el apoyo incesante de los muchos amigos que tengo la suerte de haber conocido y querido. A riesgo de resultar excesivo, no quiero que se me olvide nadie en esta larga lista de agradecimientos a los que han fundamentado la existencia de este trabajo.

En primer lugar, y como no podría ser de otra forma, quiero dar las gracias a mis padres, que se desviven por sus tres hijos, que no piensan en nada más que en nuestro bienestar y que me han apoyado en todas las circunstancias de mi vida, en las buenas y en las no tan buenas y a los que, aunque no suelo demostrarles mi cariño tan habitualmente como debiera, quiero y respeto con todas mis fuerzas. De la misma forma quiero dar las gracias a mis hermanos, Gonzalo y Ana, que me han tratado siempre como a un igual a pesar de la diferencia de edad, mostrando siempre su admiración y su cariño, que es el mismo que yo les profeso a ellos. Cómo no, también quiero dar las gracias a mis abuelos, Salvador y Maruja, que no han cesado de preocuparse por su nieto chico, el que está en Sevilla, y que está enormemente orgulloso de tener la familia que tiene. Del mismo modo, quiero dar las gracias al resto de mi familia, en especial a mis tíos José Carlos y Emilia, a mis primos Salvador, Javier, Vevi, Cristina y Julia, a mi sobrina Julia, a mi cuñado Juan de Dios, y a Conchita.

En el plano académico son muchos también los que han contribuido a la consecución de este proyecto. Empiezo por el Colegio Caja General de Ahorros de Granada, donde me acuerdo con especial cariño de las maestras Luisa Siles Alba y Consuelo Mañas Ferrón, así como de los profesores José Cifuentes Diez, María Piedad González Portillo, José Miguel Marfil Castro, Beatriz Vázquez Bustos, Manuel Fernando Ruiz de la Torre y de la directora del centro, Doña Ramona Fernández Vior. Quiero dar las gracias especialmente a Don José Cifuentes, responsable de que a día de hoy siga siendo un enamorado de la poesía y la literatura y a Manuel Ruiz por haberme inculcado el amor a la música clásica y coral. En la etapa de educación secundaria, recuerdo con muchísimo cariño a todo el personal del Instituto Alhambra de Granada y, en especial, a los profesores Concha Marta Lasso, sin duda una de las

personas que más ha influido en mi vertiente humanística, Carmen Quirós Quirós, que expresó mi vocación científica junto al profesor Miguel Ángel Egea Corriente, que consiguió que amara las matemáticas por encima de casi cualquier disciplina. También dar las gracias a Carmen Polanco Delgado, a Francisca García Felices, a Amparo Martín López, a Carmen Díaz Aguilar, a María de los Ángeles Carmona Puertollano, a Nieves Sánchez Rega, a Javier Vílchez Joya, a Isabel García y a los tristemente fallecidos Justiniano García López y Matilde Galera Sánchez.

En cuanto a la Universidad, quiero agradecer especialmente las valiosísimas aportaciones de aquellos profesores que han contribuido, con sus consejos, su sabiduría y su experiencia a la culminación de mi carrera universitaria. Quiero dar las gracias a Manuel Heredia Zapata, a Ramón González Carvajal, a Manuel Ángel Perales Esteve, a Emilio Gómez González, a Antonio González Fernández, a Consuelo Bellver Cebreros, a Francisco José Simois Tirado, a Andrés Jiménez Losada, a Eva María Arias de Reyna Domínguez, a Francisco Javier Payán Somet, a José Ignacio Acha Catalina, a Rafael Boloix Tortosa, a Luis Javier Reina Tosina, a Carlos Crespo Cadenas, a Sergio Cruces Álvarez, a Alejandro Carvallar Rincón y a José Ramón Cerquides Bueno por sus excelentes clases, trato dispensado y experiencia científica y humana en mi formación como Ingeniero de Telecomunicación.

Mención especial merece la profesora Laura María Roa Romero, por haber sido mi mentora en el mundo de la Ingeniería Biomédica, que aprendí a amar gracias a sus clases magistrales, pero sobre todo a su humanidad, a su experiencia vital compartida y a tantas y tantas tardes de amistad. Gracias, de todo corazón, por haber compartido conmigo tanto y tan bueno.

Por supuesto, no tengo más que palabras de admiración, agradecimiento, respeto y profundo cariño por mis tutoras Begoña Acha Piñero y Carmen Serrano Gotarredona, que desde aquel día en que un estudiante de primer curso fue a preguntarles por aquello de las imágenes médicas me han dado su apoyo, su cariño, su comprensión, su sabiduría y su paciencia. No sabéis cuán agradecido os estoy y os estaré siempre, cuánto he aprendido de vosotras, de vuestro coraje, vuestra capacidad de trabajo e ímpetu. Gracias por todo.

También quiero dar las gracias a todos los compañeros, becarios y profesores, del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones con los que he trabajado codo con codo en el último año. Gracias a Pablo Aguilera Bonet, Pablo Martínez Olmos, Michel Allegue, Luis Salamanca Miño, Lydia María Borrego, María José Madero, Auxi Sarmiento Vega, Irene Fondón, Jorge Cordero, gracias a todos por tanto compartido y por vuestra amistad. Quiero dar en especial las gracias a Antonio Foncubierta Rodríguez, mis pies y mis

manos, como yo lo llamo, por su entrega, su capacidad de trabajo y de amistad, que nunca olvidaré, y por ser el cincuenta por ciento de este proyecto que hoy defiendo. Por supuesto, a Aurora Sáez Manzano, confidente, amiga, compañera y siempre dispuesta a poner el hombro. También a Carlos Sánchez Mendoza, que con su ánimo, su entrega, y su amistad se ha hecho con un trocito de mi corazón. Muchísimas gracias a todos.

Por último, aunque no menos importante, quiero dar las gracias a todos mis amigos. Cuando me fui de Granada, hace ya casi ocho años, dejé allí a los mejores amigos que alguien desearía tener, y que hoy mantengo por suerte. Quiero dar las gracias a Alberto González-Zambrana García, que me acompaña en la vida desde que tenemos seis años, y que sigue siendo alguien imprescindible en el que espero poder apoyarme muchos años más. A Raúl Bújez Aguilera, que ha estado ahí en los buenos y en los malos ratos, que me apoya en todas las circunstancias, y al que nunca podré decirle cuánto lo quiero. A Víctor Bolívar Romero, por tantos años de amistad sincera, de cariño, de vivencias, de descubrimientos, de confianzas. A Antonio Ochoa Novillo, que en pocos años se ha ganado mi amistad y mi admiración con los méritos del primer y mejor de los amigos. A Laura Morillas Gásquez, por demostrarme durante estos años que nuestra amistad está por encima de todo. Gracias de veras a todos. También quiero dar las gracias a Rocío Torres Vera, a Ana Hernández Galán, a Pilar Martínez Martín y a Marta Godoy Alba por tantos años de amistad compartida.

Pero claro, ocho años en Sevilla dan para mucho, y me siento orgulloso y enormemente agradecido a todas las personas que han contribuido a que yo sea hoy la persona que soy. Quiero dar las gracias a mis amigos del Coro de la Universidad de Sevilla, Carlos Larrinaga, Celia Méndez, Elena Luque, José Julián Lavado, Manu Ríos, Laura Saavedra, Beatriz Saavedra, Carmen Pareja, Alejandro Barriga, Marta Gómez, Estefanía González, Vanesa García Cubiles y Luis Rodríguez (el culpable de que entrara), por tantos y tantos momentos de vida, de música y de amistad. También al Coro de la Universidad de Sevilla, como institución, y a su director, José Carlos Carmoña Sarmiento, por permitirme desarrollarme como músico y como amante de la música clásica.

También quiero dar las gracias a mis amigos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros, con los que he conseguido sobrellevar el peso de la carrera, y a los que me une una amistad que me ha aliviado en los momentos de desesperanza. Quiero dar las gracias sobre todo a Marta Jiménez Martín, aquella rubita que tosía el primer día de clase y de la que aún no me he separado ni me separaré, a su hermana Ana, a Esther García Sánchez, compañera de batallas desde primera hora y amiga para toda la vida, a Luisfran Macera Jara, a Elena Márquez Segura, porque ella sabe que la providencia hizo que estuvie-

ra ahí en el momento adecuado, a José Antonio Pérez Cobo, Carmen Maraver Martínez y Ana Merino Hoyo, por su apoyo, su amistad, su comprensión y su cariño. A Cristina Nieto Coronado, por su lealtad y por la profunda admiración que siempre he sentido por ella como ingeniera y como ser humano. También a Sergio Fernández Navarro e Isaac Castro Mateos, por su amistad en los últimos cursos de la carrera.

Por último, a mis amigos de Sevilla, con los que he vivido el día a día de los últimos ocho años, y gracias a los que he forjado mi personalidad. Quiero dar las gracias a Juan Luis Ribelles Ibáñez, por tanto, por todo, y por lo que tendrá que venir. A Abel Moreno Yoldi, compañero de vivencias y batallas, a Juan Ignacio Martínez Oliver, por su amistad sincera, su complicidad y las experiencias vividas. A Jesús Fernández de la Cruz, porque hay poca gente tan especial como él en el mundo. A Fernando Hernández por creer en mí, por demostrarme tantas veces su cariño y por estar ahí para cuando lo necesitas. A Elena Martínez Vázquez, porque sin ella la vida sería mucho más aburrida, y porque hay pocas personas que encajen mejor con mi forma de ser. A Fran Granados Cabrera, Pedro Sánchez y Víctor Narváez, por su cariño y su constante atención. También a Daniel Villalba, que ha sufrido mi convivencia en mi último año en Sevilla y se ha convertido en un gran amigo.

Gracias a todos.

ÍNDICE GENERAL

Índice general	I
Índice de figuras	VI
Índice de cuadros	VIII
1 Introducción	1
1.1. Definición del proyecto	4
1.2. Marco del proyecto	6
1.2.1. Objetivos de VirSSPA	6
1.2.2. Características de VirSSPA	7
1.2.3. Mejoras propuestas	8
I Estado del Arte	10
2 Imágenes Médicas	11
2.1. Introducción	13
2.2. Fundamentos de Imágenes Médicas	15
2.2.1. Radiografía	15
2.2.1.1. Radiografía Proyectiva	16
2.2.1.2. Fluoroscopia y Angiografía	18
2.2.1.3. DEXA	19
2.2.2. Tomografía	19
2.2.2.1. Tomografía Axial Computerizada (CT)	19
2.2.2.2. Tomografía por emisión de positrones (PET)	25
2.2.3. Resonancia Magnética (MRI)	27
2.2.4. Ultrasonografía Médica	28
2.3. El estándar DICOM	29
2.3.1. Estructura de un fichero DICOM	31
3 Segmentación de Imágenes Médicas	33
3.1. Introducción	34
3.2. Clasificación de técnicas de segmentación 3D	36

3.2.1.	Métodos de decisión dura, basados en bordes y automáticos	36
3.2.1.1.	Métodos de isosuperficie	36
3.2.1.2.	Métodos basados en el gradiente	40
3.2.2.	Métodos borrosos, basados en bordes y automáticos . .	40
3.2.3.	Métodos de decisión dura, basados en bordes y asistidos	41
3.2.3.1.	Active Contours	41
3.2.3.2.	Live wire/lane	43
3.2.4.	Métodos de decisión dura, basados en regiones y automáticos	44
3.2.4.1.	Umbralización	44
3.2.4.2.	Clustering	45
3.2.5.	Métodos borrosos, basados en regiones y automáticos .	46
3.2.6.	Métodos de decisión dura, basados en regiones y asistidos	47
3.2.7.	Métodos borrosos, basados en regiones y asistidos . . .	48
3.3.	Segmentación de Tejidos Blandos	50
3.3.1.	Introducción	50
3.3.2.	Presentación del problema	50
3.3.3.	Técnicas destacadas en Segmentación de Tejidos Blandos	50
3.3.4.	Modelo estadístico deformable	52
3.3.4.1.	Crecimiento de regiones por mapeado de conectividad borrosa	55
4	Recuperación de Imágenes Médicas	58
4.1.	Introducción a la recuperación de imágenes	59
4.1.1.	Extracción de características de la imagen	60
4.1.1.1.	Color	60
4.1.1.2.	Textura	60
4.1.1.3.	Características locales y globales	61
4.1.1.4.	Segmentación y características de forma . . .	61
4.1.1.5.	Características semánticas de alto nivel	61
4.1.2.	Distancia entre dos imágenes	62
4.1.3.	Métodos de acceso y almacenamiento	63
4.1.4.	Otros métodos adicionales	63
4.2.	¿Por qué usar un sistema <i>retrieval</i> en la práctica clínica?	65
4.2.1.	La necesidad de sistemas basados en contenido	65
4.3.	Recuperación de Imágenes y Formas 3D	67
4.3.1.	Introducción	67
4.3.2.	Recuperación de Imágenes 3D basada en contenido . .	67
4.3.2.1.	Fundamentos	67
4.3.3.	Normalización	68
4.3.3.1.	Métodos de registro basados en escena	71
4.3.3.2.	Métodos de registro basados en objeto	73

4.3.4.	Taxonomía de Sistemas Retrieval 3D	77
4.3.4.1.	Sistemas basados en características	78
4.3.4.2.	Sistemas basados en grafos topológicos	83
4.3.4.3.	Sistemas basados en geometría	84
4.4.	Métodos de recuperación de imágenes médicas	86
4.4.1.	Características usadas	86
4.4.1.1.	Formulación de la consulta	86
4.4.1.2.	Texto	86
4.4.1.3.	Características visuales	86
4.4.2.	Métodos de comparación	87
4.4.3.	Evaluación del sistema	88
 II Diseño e Implementación		 89
 5 Metodología		 90
5.1.	Introducción	91
5.2.	Diseño de Algoritmos de Segmentación	93
5.2.1.	Introducción	93
5.2.2.	Necesidad de un paso de preprocesado	95
5.2.2.1.	Normalización	95
5.2.2.2.	Filtrado de Mediana	96
5.2.2.3.	Enventanado Lineal y Expansión Automática de Histograma	97
5.2.2.4.	Transformación Sigmoidal	99
5.2.3.	Crecimiento de Regiones	100
5.2.4.	Ajuste final de los resultados	103
5.2.5.	Postprocesado	104
5.3.	Caracterización de Imágenes	106
5.3.1.	Introducción	106
5.3.2.	Extracción de características	107
5.3.3.	Primera aproximación: análisis de forma de estructuras óseas	107
5.3.3.1.	Introducción	107
5.3.3.2.	Metodología	108
 6 Resultados		 111
6.1.	Introducción	112
6.2.	Resultados de la fase de Preprocesado	114
6.2.1.	Normalización	115
6.2.2.	Filtrado de Mediana	116
6.2.3.	Enventanado Lineal	117
6.2.4.	Enventanado Sigmoidal	118
6.3.	Resultados de la fase de Segmentación	120

6.3.1.	Establecimiento definitivo de parámetros	120
6.3.1.1.	Relación de casos analizados	120
6.3.1.2.	Elección de parámetros	124
6.3.2.	Colección de casos para validación del algoritmo . . .	126
6.3.2.1.	Segmentación de columna vertebral y costillas en imágenes correspondientes a un tórax con implante de mama	126
6.3.2.2.	Segmentación de pulmones en imágenes correspondientes a un tórax con implante de mama	127
6.3.2.3.	Segmentación de cráneo en imágenes correspondientes a la cabeza de un niño pequeño con diversas malformaciones	129
6.3.2.4.	Segmentación de cerebro en imágenes correspondientes a la cabeza de un niño pequeño con diversas malformaciones	130
6.3.2.5.	Segmentación de pelvis en imágenes correspondientes a las extremidades inferiores de un paciente anónimo	132
6.3.2.6.	Segmentación de corazón con contraste en imágenes correspondientes al tórax de un paciente anónimo	133
6.3.2.7.	Segmentación de riñón en imágenes correspondientes al vientre de un paciente anónimo	135
6.3.2.8.	Segmentación de corazón sin contraste en imágenes correspondientes al tórax de un paciente anónimo	136
6.3.2.9.	Segmentación de grasa en imágenes correspondientes a la región pélvica	138
6.3.2.10.	Segmentación de tejido óseo en tronco y pelvis	139
6.3.2.11.	Segmentación de músculo en imágenes correspondientes a la región pélvica	141
6.3.2.12.	Segmentación de vasos sanguíneos en imágenes correspondientes a la región pélvica	142
6.3.2.13.	Segmentación de pelvis y fémur en imágenes correspondientes a la región pélvica	144
6.3.2.14.	Segmentación de tumor de vejiga en imágenes correspondientes a la región pélvica	145
6.4.	Resultados de la fase de Postprocesado	147
6.5.	Resultados de la Caracterización de Imágenes	151
7	Conclusiones y trabajo futuro	157
7.1.	Conclusiones	158
7.1.1.	Evaluación de objetivos	158

7.1.2. Evaluación de las mejoras propuestas	160
7.2. Líneas futuras	161
A Registro de imágenes 3D	
con modelos de forma	162
A.1. Introducción	162
A.2. Fundamentos de Registro de Imágenes 3D	163
A.2.1. Métodos de registro basados en escena	164
A.2.1.1. Método Rígido	165
A.2.1.2. Método Deformable	166
A.2.2. Métodos de registro basados en objeto	167
A.2.2.1. Método Rígido	167
A.2.2.2. Método Deformable	169
A.3. Metodología	169
Bibliografía	172

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Interfaz de visualización de VirSSPA	8
2.1. Imágenes en quirófano	14
2.2. Radiografía Proyectiva	17
2.3. Dispositivo para fluoroscopia	19
2.4. Ejemplo de imagen CT	21
2.5. Escáner CT: Primera Generación	21
2.6. Segunda, Tercera y Cuarta Generación de escáneres CT	22
2.7. Proyecciones de un objeto elíptico	23
2.8. Transformada de Radon	24
2.9. Ejemplo de imagen PET	25
2.10. Ejemplo de imagen PET/CT	26
2.11. Ejemplo de imagen PET/MRI	26
2.12. Ejemplo de imagen MR	27
2.13. Ejemplo de ultrasonografía	28
2.14. Ejemplo de ficheros DICOM	30
3.1. Isosuperficies	38
3.2. Cubos Desplazantes	39
3.3. Ejemplo de Marching Cubes	40
3.4. Ejemplo de Active Contours	42
3.5. Live wire/lane	43
3.6. Ejemplo de Umbralización	44
3.7. Ejemplo de Clustering	46
3.8. Ejemplo de Umbralización Borrosa	47
3.9. Diagrama de fuerzas internas	54
3.10. Diagrama de flujo del algoritmo	56
4.1. Arquitectura genérica de un sistema retrieval para imágenes.	59
4.2. Modelo de un sistema de recuperación 3D	68
4.3. Diversas tazas y sus ejes principales.	69
4.4. Taxonomía de sistemas de recuperación de imágenes 3D	77
4.5. Cálculo del volumen tridimensional.	79
4.6. Distribuciones de forma	81

4.7. Histograma de forma de superficie molecular	82
4.8. Ejemplo de armónicos esféricos	82
4.9. Ejemplo de grafos de esqueleto	84
4.10. Extracción de vistas	84
5.1. Diagrama de flujo del Algoritmo	94
5.2. Filtrado de Mediana	97
5.3. Enventanado Lineal	98
5.4. Transformación Sigmoidal	100
5.5. Diagrama de flujo del algoritmo de ajuste	104
6.1. Resultados del proceso de Normalización	115
6.2. Resultados del filtrado de Mediana	116
6.3. Resultados del proceso de Enventanado Lineal	117
6.4. Resultados del Enventanado Sigmoidal Tejidos A	118
6.5. Resultados del Enventanado Sigmoidal Tejidos B	119
6.6. Resultado de la segmentación (caso 1).	127
6.7. Resultado de la segmentación (caso 2).	128
6.8. Resultado de la segmentación (caso 3).	130
6.9. Resultado de la segmentación (caso 4).	131
6.10. Resultado de la segmentación (caso 5).	133
6.11. Resultado de la segmentación (caso 6).	134
6.12. Resultado de la segmentación (caso 7).	136
6.13. Resultado de la segmentación (caso 8).	137
6.14. Resultado de la segmentación (caso 9).	139
6.15. Resultado de la segmentación (caso 10).	140
6.16. Resultado de la segmentación (caso 11).	142
6.17. Resultado de la segmentación (caso 12).	143
6.18. Resultado de la segmentación (caso 13).	145
6.19. Resultado de la segmentación (caso 14).	146
6.20. Segmentación de grasa sin postprocesado	147
6.21. Segmentación de grasa tras postprocesado	148
6.22. Segmentación de músculo sin postprocesado	149
6.23. Segmentación de músculo con postprocesado	150
6.24. Registro de estructuras óseas	151
6.25. Vistas del registro de imágenes	152
6.26. Medida de los radios de los huesos	153
6.27. Distribución de casos	156
A.1. Concepto de registro de imágenes basado en modelo de forma.	170
A.2. Metodología propuesta	171

ÍNDICE DE CUADROS

6.1. Evaluación de resultados.	124
--	-----

INTRODUCCIÓN

“Si consigo ver más lejos es porque he conseguido auparme a hombros de gigantes”.

Isaac Newton.

La formación adquirida en la titulación de Ingeniería de Telecomunicación permite a los alumnos escoger, para la realización de su Proyecto Fin de Carrera, de entre un inmenso abanico de posibilidades.

Siempre hemos pensado que la ciencia, la técnica y la tecnología, vértices del triángulo de la ingeniería, han de estar al servicio de la mejora de la condición humana, sin olvidar por supuesto el respeto a la naturaleza y al mundo en que vivimos. Y es por eso que, desde que comenzamos los estudios de Ingeniero de Telecomunicación, nos hemos sentido vocacionalmente vinculados con las diferentes líneas de investigación relacionadas con la Ingeniería Biomédica.

Sobre esta premisa inicial, esperamos que este proyecto aporte nuevas soluciones a la planificación quirúrgica a través del estudio y diseño de algoritmos de segmentación y caracterización de imágenes. A grandes rasgos, este proyecto aporta algunas mejoras a la segmentación de imágenes médicas en tres dimensiones, basándose en el software utilizado hasta ahora por la **Unidad de Cirugía Plástica y Grandes Quemados** de los Hospitales Universitarios **Virgen del Rocío** de Sevilla, cuyo director es el Doctor Pedro Tomás Gómez Cía. Este software de planificación, llamado **VirSSPA**, será la base de nuestro desarrollo.

A pesar de que VirSSPA fue inicialmente diseñado únicamente como un software de planificación quirúrgica, a nadie escapa que sus posibilidades trascienden este campo de aplicación para abarcar multitud de aplicaciones en el mundo de la Medicina. Entre las aplicaciones que más interés suscitan entre el personal facultativo podríamos destacar la prevención, diagnóstico y planificación de la terapia de diversos tipos de cáncer, enfermedad causante de la mayoría de muertes en España; por otro lado, los especialistas de los distintos tipos de cirugías podrán planificar de forma mucho más eficiente sus operaciones (en casi todos los campos de la Medicina) y obtener así mayores posibilidades de éxito al haber resuelto, de forma virtual, algunos de los problemas que luego se presentarán en la mesa de quirófano, cuando ya no hay tiempo para elucubraciones.

La memoria del proyecto se organiza en siete capítulos y dos partes, reflejo fidedigno del proceso de estudio, análisis y obtención de resultados realizado. En el primero de ellos, definimos el proyecto y las líneas de investigación seguidas para conseguir los objetivos marcados y, además, explicamos el marco de desarrollo del mismo y las características del proyecto **VirSSPA**.

Tras este primer capítulo de introducción, comienza la primera parte de la memoria, en la que se desarrolla el **Estado del Arte** del presente Proyecto Fin de Carrera. Así pues, en el capítulo 2 abordamos las diferentes líneas de investigación concernientes al procesado digital de imágenes médicas y, como marco conceptual general del proyecto, a los diferentes avances de la Ingeniería Biomédica. Trataremos con especial interés aspectos generales de la imagen médica que introducirán al lector en el campo de investigación que nos ocupa. En el capítulo 3 abordamos, de forma más concreta, la segmentación de imágenes médicas, prestando especial atención al caso tridimensional y a los diferentes métodos existentes en la literatura. En el capítulo 4 mostramos las diferentes líneas de investigación en el campo de recuperación y clasificación de imágenes médicas, desarrollando brevemente las distintas tendencias y fundamentos de la recuperación de casos clínicos mediante el estudio de la imagen y, de nuevo, poniendo hincapié en las imágenes en tres dimensiones.

En la segunda parte de la memoria, **Implementación y Resultados**, mostramos el proceso de diseño de los diferentes algoritmos desarrollados, mostramos los resultados obtenidos y extraemos una serie de conclusiones. En el capítulo 5, Metodología, explicamos de forma prolija todos los pormenores del proceso de diseño de los algoritmos, los fundamentos matemáticos y físicos de los mismos, y su implementación final. Como no podía ser de otra manera, el capítulo consta de dos partes bien diferenciadas: una dedicada a la Segmentación de imágenes médicas en tres dimensiones y otra dedicada a la Caracterización de imágenes médicas en tres dimensiones. En el capítulo 6 mostramos todos los resultados, obtenidos secuencialmente conforme al

proceso de pruebas y validación, de manera que el lector podrá comprobar la correspondencia existente entre la implementación final del algoritmo y las diferentes y múltiples pruebas realizadas. Por último, en el capítulo 7, obtenemos una serie de conclusiones y marcamos los cauces de futuras líneas de investigación.

1.1. Definición del proyecto

El proyecto *Aportaciones a la Segmentación y Caracterización de Imágenes Médicas 3D* nace con una doble función: en primer lugar, desarrollar diversos algoritmos de segmentación de imágenes médicas en tres dimensiones para la herramienta de planificación quirúrgica **VirSSPA**, de manera que no sólo se resuelvan algunas de las carencias de la herramienta, sino que además se añadan funcionalidades propias del procesado digital de la imagen que pueden producir una mejor consecución de los objetivos del facultativo a la hora de planificar las intervenciones quirúrgicas. Por otro lado, han de diseñarse además algoritmos de clasificación y recuperación de imágenes médicas en tres dimensiones, de manera que esta nueva funcionalidad sea añadida a las múltiples ya existentes en la herramienta.

Para acometer esta empresa, en primer lugar, hemos examinado rigurosamente el Estado del Arte de ambas líneas de investigación. Posteriormente, hemos circunscrito nuestra aplicación en aquellas soluciones científicas y técnicas que mejor se ajustaban al problema planteado, y hemos diseñado algoritmos que resuelven las dificultades antes planteadas y que, además, permitan cierta flexibilidad para que puedan ser adaptados a otras aplicaciones. Del análisis pormenorizado de los resultados obtenidos hemos extraído valiosas conclusiones que nos han servido, de una parte, para modificar los planteamientos primeros de la solución del problema, y de otra, para establecer diversas premisas en el análisis y estudio de las imágenes médicas en tres dimensiones.

La secuencia natural de pasos que hemos dado en la elaboración del proyecto es la siguiente:

1. Estudio del Estado del Arte sobre Imágenes Médicas.
2. Estudio del Estado del Arte sobre Segmentación de Imágenes en dos y tres dimensiones.
3. Estudio del Estado del Arte sobre Caracterización y Recuperación de imágenes médicas.
4. Desarrollo de algoritmos de Segmentación de Imágenes Médicas en tres dimensiones.
5. Período de pruebas para el algoritmo de segmentación. Modificación de premisas iniciales.
6. Obtención de resultados. Mejoras de la solución. Resultados finales.
7. Desarrollo de algoritmos de Caracterización de Imágenes Médicas en tres dimensiones.

8. Período de pruebas de la Caracterización de imágenes. Modificación de premisas iniciales.
9. Obtención de resultados. Mejoras de la solución. Resultados finales.
10. Conclusiones finales que marcan la línea de investigación que ha de continuar.

Hemos optado por esta estructura para que la experiencia resulte lo más pedagógica posible, tanto para los lectores del proyecto como para nosotros mismos.

Así pues, no sólo desarrollamos los conceptos que conforman el núcleo tecnológico del proyecto, como podría ser la segmentación de imágenes médicas en tres dimensiones, sino que, además, hemos desarrollado brevemente algunos temas transversales que son de crucial importancia para comprender los objetivos y los resultados del proyecto en su totalidad. Todos estos conceptos son prioritarios para el profesional que quiera centrar sus experiencia investigadora en el campo de las imágenes médicas.

El tratamiento informático de las imágenes médicas tridimensionales necesita de lenguajes de programación que optimicen el uso de la memoria RAM y el tiempo de computación. Es por esto que hemos optado por el lenguaje de programación **C++** y por las librerías de **ITK** (*Insight Tool Kit*), así como de la herramienta de visualización **3D Slicer**. Tanto ITK como 3D Slicer pertenecen al grupo de tecnologías software denominadas *open source*, esto es, software libre, por lo que su aplicación está exenta de taras económicas y legales que impiden en muchas ocasiones el desarrollo completo del sistema. Ambas tecnologías, a pesar de su elevado nivel de complejidad, ofrecen un sinfín de posibilidades que deben ser y serán aprovechadas, sin duda, por los ingenieros de la imagen médica.

1.2. Marco del proyecto

Como ya hemos mencionado anteriormente, el presente proyecto se enmarca en el proyecto de mayor envergadura *Realidad Virtual Aplicada a la Optimización de Procesos Quirúrgicos, VirSSPA*. Se trata de un proyecto de I+D+i basado en tecnologías informáticas y de realidad virtual de última generación en el campo de la Medicina y la innovación sanitaria.

Está financiado por la Consejería de Salud de la Junta de Andalucía, y dirigido por el Dr. Pedro Tomás Gómez Cía, jefe de la sección de Cirugía Plástica de los Hospitales Universitarios Virgen del Rocío. En este proyecto han participado informáticos de la Fundación *Alcalá Innova* e ingenieros de la Universidad de Sevilla, procedentes de los departamentos de Ingeniería de Organización y de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Es en este último donde hemos desarrollado el proyecto que ahora presentamos.

El objetivo primero de VirSSPA [1] es el diseño, desarrollo y validación de un software que permita dotar a los facultativos de una infraestructura y conjunto de herramientas basadas en técnicas de realidad virtual, de ayuda a la planificación y a la simulación de intervenciones quirúrgicas de cabeza y cuello, aunque posteriormente pueda ser ampliado a todas las regiones anatómicas.

Se ha integrado en el proyecto de Metodología de gestión de procesos de negocio BMP (Business Process Management). BMP es un conjunto de servicios, herramientas y metodologías que permiten el análisis, diseño, ejecución y monitorización de los procesos de negocio.

1.2.1. Objetivos de VirSSPA

Los objetivos generales de VirSSPA son:

1. Optimizar el proceso de planificación quirúrgica en intervenciones de cirugía de cabeza y cuello mediante el desarrollo de una herramienta de ayuda que permita disminución de tiempos de programación de las intervenciones, disminución de tiempos de quirófano y mejora de los resultados en dichas intervenciones.
2. Facilitar el entrenamiento y formación de los profesionales sanitarios.
3. Servir como paso previo a la extensión de estas tecnologías a otras especialidades médicas.

Otros objetivos específicos de VirSSPA son:

1. Disminución de tiempos de quirófano: reducción de costes (coste horas-quirófano) y aumento de la calidad de trabajo de los profesionales sanitarios al evitar el cansancio y falta de concentración consecuencia de las intervenciones de larga duración.
2. Incremento de la tasa de éxito en las intervenciones: el médico conoce el alcance exacto de la lesión que sufre el paciente antes de proceder a la operación. Se evitarán problemas derivados de la necesidad de improvisar soluciones sobre la mesa de operaciones y se disminuirá el coste prueba-error.
3. Aumento de la calidad asistencial a los pacientes: disminución del tiempo de espera hasta la intervención y del tiempo dentro del quirófano con la consiguiente reducción de riesgos.

1.2.2. Características de VirSSPA

A día de hoy, el software presenta las siguientes características y funcionalidades:

1. Jerarquización de la información. Se establecen diferentes niveles en el tratamiento de los datos implicados en el programa.
2. Arquitectura modular de la aplicación, adecuada a la programación orientada a objetos.
3. Distintos formatos de Almacenamiento, para así conceder al sistema de máxima versatilidad.
4. Visualizador realista para el manejo de la información en tres dimensiones, de modo que el facultativo pueda escoger el ángulo de visualización y los efectos de diversas modificaciones quirúrgicas.
5. Librería de materiales, que sirve de base de datos del programa.
6. Visualización por capas, gracias al proceso de segmentación.
7. Revisión del cálculo de las distancias, para que en proceso quirúrgico el facultativo conozca las dimensiones exactas de las diversas operaciones que ha de realizar, tales como incisiones, recortes de tejidos, etcétera.
8. Extracción de partes conexas de la geometría.
9. Transformaciones espaciales del modelo.
10. Carga de datos DICOM, correspondientes al estándar de documentación clínica, que definiremos más adelante.

11. Paso a Estereolitografía (STL).

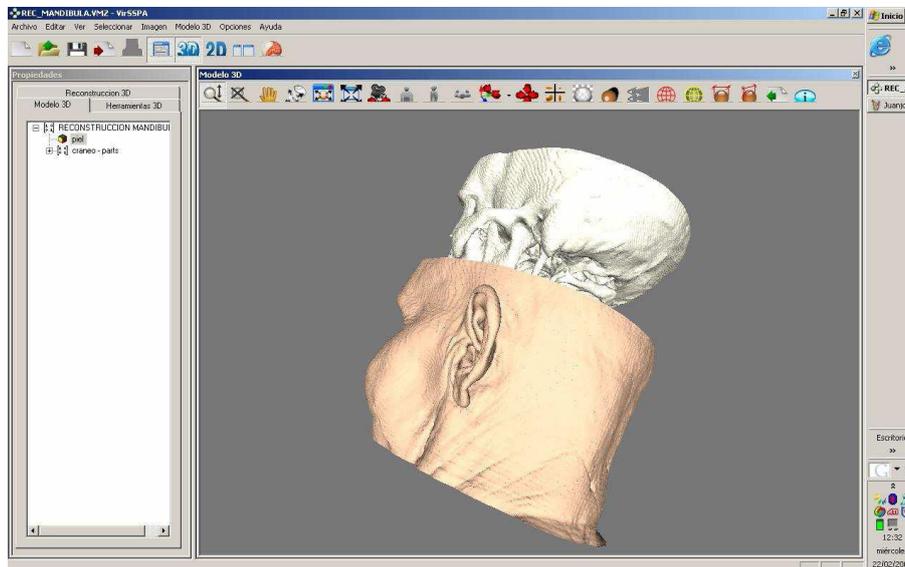


Figura 1.1: Interfaz de visualización de VirSSPA.

1.2.3. Mejoras propuestas

Actualmente, los facultativos emplean aproximadamente unos noventa minutos, de media, en la simulación de una intervención quirúrgica. De estos 90 minutos, aproximadamente la mitad se emplea en la segmentación de los tejidos en tres dimensiones requeridos por el cirujano. Es esta cuestión, por tanto, el cuello de botella temporal del sistema. Y es aquí donde nuestro proyecto quiere aportar una solución, de modo que el facultativo reduzca a menos de la mitad el tiempo destinado a la planificación de la operación.

VirSSPA utiliza una segmentación o bien basada en umbrales o bien basada en selección de semillas y crecimiento de regiones [1]. Pero este algoritmo adolece de algunas limitaciones, dado que el tiempo de cómputo es muy elevado, los resultados obtenidos se alejan en ocasiones de lo esperado y el médico ha de fijar experimentalmente tanto los umbrales como las sucesivas semillas en las distintas alternativas de la herramienta de planificación. Por tanto, el presente proyecto habrá de resolver estas cuestiones de modo que no sólo se elimine el cuello de botella existente sino que, además, los resultados obtenidos mejoren notablemente las posibilidades del software en cuestión.

Además, se pretende añadir un módulo de recuperación de imágenes médicas basada en contenido, de modo que habrá que realizar un estudio de ca-

racterísticas de forma de las imágenes segmentadas y, posteriormente, crear un clasificador que localice los casos más parecidos al que en esos momentos sea objeto de estudio, al realizar la búsqueda en una base de datos adecuada, cuyo diseño no entra en los límites de nuestro proyecto.