II. Introducción

1. Organización de la memoria

La memoria del proyecto está estructurada en ocho secciones, siendo la primera de ellas el índice.

La segunda de las secciones constituye la Introducción de la memoria, que contiene información sobre cómo está estructurada la memoria y plantea las motivaciones de un proyecto como el que se presenta dibujando para ello el escenario actual en el área de la segmentación de imágenes médicas. Posteriormente se revisan y definen brevemente algunos conceptos importantes para la comprensión y la adecuada contextualización del resto de la memoria. Entre estos conceptos se encuentran los formatos de imágenes empleados (*DICOM*), las técnicas de imagen con las que se ha trabajado (*TAC*), la definición clásica de segmentación de imágenes, nociones de la anatomía del corazón humano, así como del estudio electrofisiológico, intervención dentro de la que se emplea de forma sistemática (en función de la patología a tratar y otras variables) la segmentación de la aurícula izquierda a partir de imágenes de resonancia o *TAC*.

En la sección tercera se aborda el estado del arte en segmentación de imágenes, repasando la clasificación de los distintos tipos de algoritmos de segmentación que se vienen empleando. Asimismo, también se introduce la plataforma *ITK* exponiendo sus principios, estructura general y funciones que ofrece a usuarios y desarrolladores en el ámbito del tratamiento de imágenes. Se finaliza el estudio del estado del arte mostrando el funcionamiento de una herramienta comercial de uso común en el ámbito hospitalario diseñada expresamente para la segmentación y registro de las cámaras cardíacas a partir de imágenes de resonancia magnética o *TAC*.

La sección cuarta explica los principios de funcionamiento de los algoritmos evaluados, y también especifica los criterios usados para la selección de dichos algoritmos de entre todos los ofrecidos por *ITK*.

La sección quinta sienta los pilares sobre los que se realiza la evaluación objeto de este proyecto. En ella se reflexiona sobre los distintos criterios para la evaluación del desempeño de algoritmos de segmentación, y se introducen los criterios comúnmente aceptados para esta tarea. Posteriormente, y apoyándose en estos criterios expuestos, se detalla el conjunto de criterios escogidos específicamente para la evaluación realizada en el presente trabajo.

En la sección sexta se exponen de manera exhaustiva todos los resultados obtenidos a lo largo de las pruebas realizadas. Para este fin, se muestra el banco de imágenes empleado y sus características, se detallan las herramientas empleadas para la evaluación, la metodología seguida para la misma, y finalmente los resultados obtenidos para cada algoritmo. Finalmente, se agrupan los datos mostrados de manera individual en una comparativa conjunta de los cuatro algoritmos evaluados.

La sección séptima incluye las conclusiones de este proyecto, junto con algunas propuestas de investigación futuras para enriquecer los resultados obtenidos.

Por último, en la sección octava se enumeran las referencias bibliográficas empleadas para la elaboración del presente proyecto.

2. Antecedentes y Motivación

El veloz desarrollo y proliferación de las tecnologías de adquisición de imágenes médicas está revolucionando la medicina. Estas imágenes juegan un rol prominente en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades, debido a que permiten que los científicos y fisiólogos obtengan información vital observando el interior del cuerpo humano de una forma no invasiva. En consecuencia, la comunidad de análisis de imágenes ha invertido (y sigue invirtiendo) grandes esfuerzos en el desafiante problema de extraer, con ayuda de computadores, información clínica útil acerca de estructuras anatómicas a partir de imágenes de Tomografía Computarizada (*CT – Computer Tomography*), Resonancia Magnética (*MRI – Magnetic Resonance Imaging*) y otras modalidades. En particular, los algoritmos para extracción de información a partir de imágenes son conocidos como algoritmos de segmentación de imágenes, y juegan un papel importante en numerosas aplicaciones biomédicas de tratamiento de imágenes

En la medicina actual, el diagnóstico por medio del uso de imágenes es invaluable. El procesamiento de imágenes *MRI*, *TAC*, mamografía digital y otras modalidades, proveen un medio no-invasivo y efectivo de delinear la anatomía de un sujeto. Estas tecnologías han incrementado enormemente el conocimiento de anatomías y patologías para la investigación médica, y son un componente crítico en la planificación de diagnósticos y tratamientos. Con el incremento en tamaño y número de imágenes médicas, se ha hecho necesario el uso del computador para facilitar el procesamiento y análisis de las mismas. En particular, los algoritmos para el delineamiento de estructuras anatómicas y otras regiones son un componente clave para asistir y automatizar ciertas tareas radiológicas. Estos algoritmos de segmentación de imágenes juegan un papel importante en numerosas aplicaciones biomédicas de tratamiento de imágenes, como la segmentación de las distintas estructuras cardíacas en el área de electrofisiología, en particular, de la aurícula izquierda, aplicación para la que se enfoca este Proyecto Fin de Carrera.

Los métodos para llevar a cabo las segmentaciones varían ampliamente dependiendo de la aplicación específica, tipo de la imagen, y otros factores. Por ejemplo, la segmentación del tejido del cerebro tiene diferentes requerimientos que la segmentación de un hígado. Otros factores como el ruido, volúmenes parciales y movimientos en la imagen, también pueden tener consecuencias significativas en el desempeño de los algoritmos de segmentación. Más aún, cada tipo de imagen tiene un conjunto de características propio que han de ser tenidas en cuenta a la hora de abordar el problema de la segmentación. Actualmente no existe un método de segmentación que alcance resultados aceptables para todo tipo de imagen médica. No existen métodos que sean generales y que puedan ser aplicados a cualquier variedad de datos. De cualquier forma, los métodos que son especializados para aplicaciones particulares pueden obtener mejores resultados tomando en cuenta conocimiento a priori. Por lo tanto, la selección de un método apropiado para un problema de segmentación puede ser muy difícil.

El desarrollo de algoritmos de segmentación es un área en la que se ha empleado mucho esfuerzo. Sin embargo, hay considerablemente menos énfasis puesto en la evaluación precisa de estos algoritmos que en su desarrollo. En el mundo de la investigación, el desarrollo de nuevas técnicas de segmentación es un ámbito de gran interés, mientras que no siempre se emplea esfuerzo suficiente en evaluar dichas técnicas usando métricas de medición del desempeño estándar o uniformes. Aunque muchos desarrolladores de algoritmos de segmentación suelen proporcionar algo de información sobre la evaluación de sus algoritmos, aún están por desarrollarse marcos y enfoques consistentes con los que poder evaluar el desempeño de los distintos algoritmos. Aunque se han propuesto teorías unificadas, el problema no ha sido resuelto de manera global aún. En consecuencia, encontrar el algoritmo de segmentación adecuado para una tarea en particular, así como elegir los parámetros internos al

algoritmo de segmentación que son óptimos es aún un problema. Es por esta razón de vital importancia identificar las herramientas apropiadas para evaluar y comparar algoritmos de segmentación.

En este sentido, dada la enorme variedad de algoritmos de segmentación disponibles, a la hora de abordar el problema de la segmentación para su aplicación a un campo específico y el diseño de una aplicación completa, (como puede ser el caso de la aurícula izquierda que se estudia en el presente trabajo), se hace imprescindible disponer de una evaluación del desempeño de los distintos algoritmos que se pretendan emplear. Precisamente en esa línea se establece el objetivo fundamental del presente Proyecto Fin de Carrera: comparar el desempeño de distintos algoritmos de segmentación ofrecidos por la plataforma *ITK* en su aplicación a imágenes de *TAC* de la aurícula izquierda.

3. Alcance y objetivos

El propósito esencial del presente trabajo es establecer una comparativa exhaustiva bajo un conjunto de criterios comúnmente usados, junto con alguno definido por su especial adecuación en el contexto de este proyecto, del desempeño de cuatro distintos algoritmos de segmentación que proporciona la plataforma *ITK*, tomando como imágenes para el estudio comparativo *TACs* del corazón, y fijando como estructura objeto a ser segmentada la aurícula izquierda.

De esta comparativa realizada se puede extraer directamente la adecuación de los algoritmos estudiados de *ITK* para la tarea de la segmentación de la aurícula izquierda, bajo ciertas restricciones derivadas de la metodología que ha sido empleada en la evaluación, a saber:

- Los algoritmos se han utilizado directamente ejecutando las aplicaciones correspondientes sobre *ITK*, previamente compiladas, sin ayuda o mediación de interfaz gráfica alguna. Es decir, las conclusiones extraídas son absolutamente válidas siempre que se empleen estos algoritmos tal y como *ITK* los proporciona. Sería necesario evaluar y cuantificar las mejoras que la introducción de una interfaz gráfica que facilitara al usuario la tarea de la elección de los parámetros (u otras) podría producir sobre cada uno de los algoritmos.
- Para evaluar cada algoritmo se han usado tres imágenes en cortes transversales distintos. Estas tres mismas imágenes han servido para evaluar los cuatro algoritmos, por lo que es posible comparar el desempeño de cada uno de ellos (al tratarse de las mismas imágenes). Sin embargo, el número de imágenes es insuficiente para poder extraer conclusiones estadísticamente significativas. Se haría necesario extender esta comparativa a un número mayor de imágenes para alcanzar resultados significativos estadísticamente.
- Como consecuencia del anterior punto, si se desea comparar el desempeño de otros algoritmos con los evaluados en este trabajo, es necesario usar las mismas imágenes que las empleadas en el presente trabajo.
- Adicionalmente también puede considerarse la variabilidad de las segmentaciones auténticas (o *ground truth*) que diferentes expertos pueden producir. El impacto de este hecho se ha minimizado consultando a expertos en radiología y cardiología con considerable experiencia acumulada en la tarea de la segmentación de la aurícula izquierda. Más allá de este aspecto, y asumiendo que los resultados no son estadísticamente significativos ni completamente independientes del operador, se ha despreciado este hecho en la comparativa elaborada en el presente proyecto considerando que los resultados son igualmente válidos en los términos y condiciones expuestas en esta sección.

Sin embargo, tomando en consideración las restricciones citadas anteriormente, el alcance del presente proyecto se extiende a todas aquellas situaciones en las que resulte de interés establecer una comparativa que proporcione una idea cuantitativa del desempeño de algoritmos de segmentación en la tarea de la segmentación de la aurícula izquierda a partir de *TACs*.

- A la hora de abordar el diseño e implementación sobre *ITK* de una **aplicación completa** para la segmentación (en este caso, de la aurícula izquierda), sería de gran utilidad disponer de una comparativa del desempeño de diversos algoritmos de la plataforma *ITK* sobre las imágenes objeto para poder escoger el/los algoritmos que formaran parte de dicha aplicación, e incluso el orden en que aplicarlos.
- De manera adicional, este proyecto puede ser de utilidad en el desarrollo de nuevos algoritmos de segmentación (bien sobre *ITK* o no) para su aplicación sobre imágenes de *TAC* de la aurícula izquierda. Es esencial poder comparar el desempeño de un nuevo algoritmo en desarrollo con otros ya existentes. De esta manera, futuros desarrollos de algoritmos de segmentación de la aurícula izquierda pueden utilizar los resultados de la comparativa realizada en este proyecto para

cuantificar sus aportaciones con respecto a algoritmos existentes, así como emplear un sistema de evaluación similar al definido en el presente trabajo.

- Asimismo, los resultados de este proyecto proporcionan en sí mismos una completa valoración del desempeño de distintos algoritmos de segmentación de la plataforma *ITK* en su empleo para la segmentación de la aurícula izquierda a partir de imágenes de *TAC*.

4. Conceptos esenciales

Es conveniente introducir mínimamente una serie de conceptos fundamentales a los que se hará referencia a lo largo de la memoria del presente proyecto. Estos conceptos son básicamente relativos a las técnicas de imagen de interés en este proyecto (tomografía axial computerizada y resonancia magnética), así como al formato de imagen empleado para el tratamiento y procesado de las mismas (*DICOM*). Asimismo, también se revisan sucintamente conceptos propios del área de la cardiología, como la anatomía del corazón humano y el estudio electrofisiológico del mismo, para facilitar la comprensión de los objetivos del presente proyecto, así como la interpretación y el alcance de algunos de los resultados obtenidos.

1. Formato DICOM

Con la introducción de la tomografía computerizada en los años 70, seguida de otras modalidades diagnósticas de imagen digital, así como del uso creciente de computadores en aplicaciones clínicas, el Instituto Americano de Radiología (*American College of Radiology*, *ACR*) y la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (*National Electrical Manufacturers Association*, *NEMA*) reconocieron la emergente necesidad de un método estándar para transferir imágenes, junto con información asociada a las mismas, entre dispositivos hechos por distintos fabricantes. Estos dispositivos generan una gran variedad de formatos de imagen digital.

Así, en 1983 se formó un comité constituido por el *ACR* y la *NEMA* para desarrollar un estándar con los siguientes requisitos (1):

- Facilitar la comunicación de información de imágenes digitales independientemente del fabricante.
- Facilitar el desarrollo y la expansión del almacenaje de imágenes y sistemas de comunicación posibilitando también interfaces con otros sistemas de información hospitalarios.
- Permitir la creación de bases de datos con información diagnóstica que pudiera ser consultada por equipos diversos distribuidos geográficamente.

Como resultado del trabajo de este comité, el primer estándar *DICOM* es publicado en 1985 (versión 1.0), lanzándose su segunda versión durante 1988. El estándar *DICOM* está en continua evolución y es revisado y mantenido en conformidad con los procedimientos del comité del estándar *DICOM*. Estos estándares especifican una interfaz hardware, un conjunto mínimo de comandos software, así como un conjunto consistente de formatos de datos.

2. TAC - Tomografía Axial Computerizada

La Tomografía Axial Computarizada, o *TAC* (también denominada escáner), es una técnica de diagnóstico utilizada en medicina. Se trata de una tecnología de exploración de rayos X que produce imágenes detalladas de cortes axiales del cuerpo. En lugar de obtener una imagen como la radiografía convencional, la *TAC* obtiene múltiples imágenes al rotar alrededor del cuerpo. Una computadora combina todas estas imágenes en una imagen final que representa un corte del cuerpo como si fuera una rodaja. Esta máquina crea múltiples imágenes en rodajas (cortes) de la parte del cuerpo que está siendo estudiada.

Se trata, al igual que la radiografía convencional, de una técnica de visualización por rayos X. Mientras que en la radiografía convencional se obtiene una imagen plana (en dos dimensiones) de un cuerpo (tridimensional) haciendo pasar a través del mismo un haz de rayos X, puede decirse que el *TAC* viene a ser como una radiografía de una fina rodaja obtenida tras cortar el objeto en planos axiales. Estos planos axiales pueden ser de orientación coronal, transversal o sagital, o de orientaciones oblicuas que resulten de interés especial para la zona en estudio.

3. Resonancia Magnética

Una imagen por resonancia magnética (*IRM*), también conocida como tomografía por resonancia magnética (*TRM*) o imagen por resonancia magnética nuclear (*NMRI*, por sus siglas en inglés) es una técnica no invasiva que utiliza el fenómeno de la resonancia magnética para obtener información sobre la estructura y composición del cuerpo a analizar. Esta información es procesada por ordenadores y transformada en imágenes del interior de lo que se ha analizado.

Es utilizada principalmente en medicina para observar alteraciones en los tejidos y detectar cáncer y otras patologías, aunque también es utilizada industrialmente para analizar la estructura de materiales tanto orgánicos como inorgánicos.

A diferencia de la técnica de imagen expuesta en la sub-sección anterior (el *TAC*), la *IRM* no usa radiación ionizante, sino campos magnéticos para alinear la magnetización nuclear de (usualmente) átomos de hidrógeno del agua en el cuerpo. Los campos de radiofrecuencia (*RF*) se usan para sistemáticamente alterar el alineamiento de esa magnetización, causando que los núcleos de hidrógeno produzcan un campo magnético rotacional detectable por el escáner. La señal obtenida puede ser manipulada con campos magnéticos adicionales y así construir con más información imágenes del cuerpo.

4. Segmentación de imágenes médicas

Una imagen puede definirse como una colección de medidas o valores en el espacio bidimensional (*2D*) o tridimensional (*3D*). En imágenes médicas, estas medidas o intensidades de imagen pueden representar la absorción de radiación (en imágenes de Rayos X), la presión acústica (en ultrasonidos), o la amplitud de señal de radiofrecuencia (en resonancia magnética). Si se hace una medida simple para cada posición de la imagen, entonces la imagen es una imagen escalar. Si se hace más de una medida (por ejemplo: *dual-eco MRI*), la imagen es llamada imagen vector o imagen multicanal. Las imágenes pueden ser adquiridas en el dominio continuo, como el caso de las películas de Rayos X, o en el dominio discreto, como el caso de la *MRI*. En imágenes discretas 2D, la posición de cada medida se conoce como píxel y en imágenes 3D, se le llama voxel.

Clásicamente, la ***segmentación de imágenes*** se define como la partición de una imagen en regiones constituyentes no solapadas, las cuales son homogéneas con respecto a alguna característica como una intensidad o una textura. Si el dominio de la imagen viene dado por I, entonces el problema de segmentación consiste en determinar el conjunto $S_k \subset I$ cuya unión es la imagen I completa. Por lo tanto, el conjunto que conforma la segmentación debe satisfacer

$$I = \bigcup_{k=1}^{K} S_k$$

Donde $S_k \cap S_j = \emptyset$ para $k \neq j$, y cada S_k está conectado. Idealmente, un método de segmentación encuentra aquellos conjuntos que corresponden a distintas estructuras o regiones anatómicas de interés en la imagen.

5. Anatomía del corazón humano

El corazón pesa entre 200 a 425 gramos y es un poco más grande que una mano cerrada. Al final de una vida larga, el corazón de una persona puede haber latido (es decir, haberse dilatado y contraído) más de 3.500 millones de veces. Cada día, el corazón medio late 100.000 veces, bombeando aproximadamente 7.571 litros de sangre.

El corazón se encuentra entre los pulmones en el centro del pecho, detrás y levemente a la izquierda del esternón. Una membrana de dos capas, denominada «pericardio» envuelve el corazón como una bolsa. La capa externa del pericardio rodea el nacimiento de los principales vasos sanguíneos del corazón y está unida a la espina dorsal, al diafragma y a otras partes del cuerpo por medio de ligamentos. La capa interna del pericardio está unida al músculo cardíaco. Una capa de líquido separa las dos capas de la membrana, permitiendo que el corazón se mueva al latir a la vez que permanece unido al cuerpo.

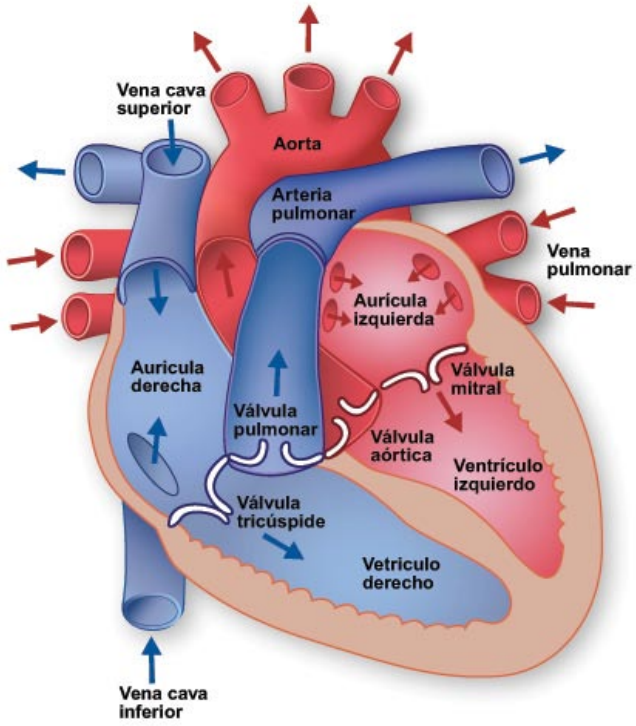


Ilustración 1: Anatomía del corazón humano

El corazón tiene cuatro cavidades. Las cavidades superiores se denominan «***aurícula izquierda***» y «aurícula derecha» y las cavidades inferiores se denominan «ventrículo izquierdo» y «ventrículo derecho». Una pared muscular denominada «tabique» o «septo» separa las aurículas izquierda y derecha y los ventrículos izquierdo y derecho. El ventrículo izquierdo es la cavidad más grande y fuerte del corazón. Las paredes del ventrículo izquierdo tienen un grosor de sólo media pulgada (poco más de un centímetro), pero tienen la fuerza suficiente para impeler la sangre a través de la válvula aórtica hacia el resto del cuerpo.

Las válvulas que controlan el flujo de la sangre por el corazón son cuatro:

- La válvula tricúspide, que controla el flujo sanguíneo entre la aurícula derecha y el ventrículo derecho.

- La válvula pulmonar, que controla el flujo sanguíneo del ventrículo derecho a las arterias pulmonares, las cuales transportan la sangre a los pulmones para oxigenarla.
- La válvula mitral, que permite que la sangre rica en oxígeno proveniente de los pulmones pase de la aurícula izquierda al ventrículo izquierdo.
- La válvula aórtica, que permite que la sangre rica en oxígeno pase del ventrículo izquierdo a la aorta, la arteria más grande del cuerpo, la cual transporta la sangre al resto del organismo.

En la Ilustración 2.a (izquierda) se muestra imagen del corazón humano en vista frontal (o antero-posterior), y en la Ilustración 2.b (derecha) se muestra una ilustración de un corte transversal del corazón en la que pueden distinguirse aurícula izquierda y venas pulmonares, aurícula derecha y la entrada a la vena cava superior, ventrículos derecho e izquierdo, así como las válvulas tricúspide y mitral.

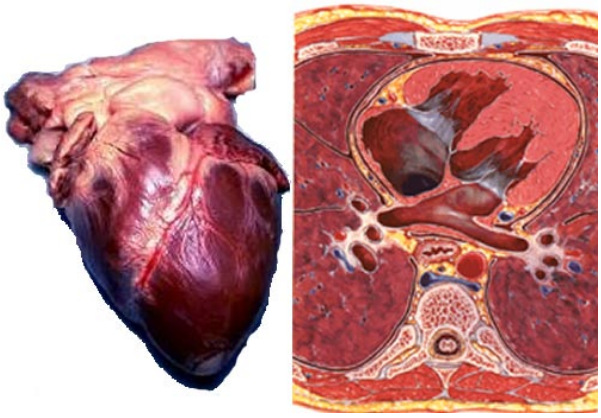


Ilustración 2: a) Corazón Humano B) Corte Transversal corazón

6. Estudio electrofisiológico

El estudio electrofisiológico consiste en un procedimiento mínimamente invasivo cuyo fin es evaluar el sistema de conducción eléctrico del corazón para valorar la actividad eléctrica y las vías de conducción del corazón. El estudio se indica con el fin de averiguar la causa, lugar de origen y tratamiento óptimo de diversas arritmias. Este tipo de estudio es llevado a cabo por un especialista (electrofisiólogo), y se realiza introduciendo uno a varios catéteres dentro del corazón a través de acceso venoso o arterial.